

# ILCの物理と測定器

末原 大幹 (東大ICEPP)  
for ILC-Japan 物理/測定器ワーキンググループ

# Contents

- ILCの物理
  - 他の実験とのすみわけ
  - ヒッグスの精密測定とそれによる新物理探索
    - 250 GeV and beyond
  - その他の探索・測定
- ILCの測定器
  - 測定器コンセプト
  - 要素技術
  - 新技術・今後の展望・開発体制など

# 3種のコライダーに関する世界の空気 (?)

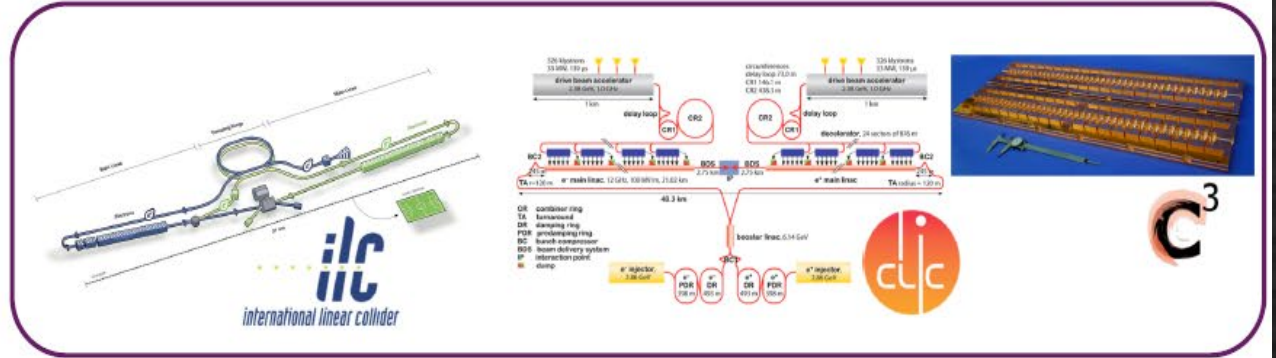
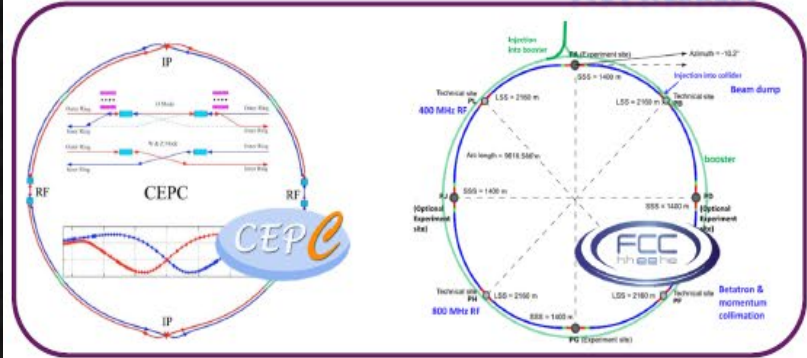
- **$e^+e^-$  Higgs factory**は技術的にすぐ作れる唯一の大型(Gold)計画
  - Linear or Circular (はやくできるほうで)、地域別の事情がある。
    - Next projectとして、世界のどこかに一つ作りたい
    - 現状の候補はILC in Japan or elsewhere, FCCee in CERN, CEPC in China
  - 将来技術としては新奇加速 (プラズマ等)
- **Hadron collider**はMagnetの開発をしてチャンスを待つ
  - 実現は技術的に2050以降で予算も膨大。Next projectとしてはきつい
  - Sustainabilityに問題がある。将来の計画としてcriticalな問題
- **Muon collider**はHadron colliderの代替として技術開発
  - TimelineはHadronに近い。ただしコンパクトな点が魅力。
  - 課題は多い (ミューオン源、ミューオン冷却、ニュートリノ放射、測定器 backgroundなど)

# Higgs factories and detectors

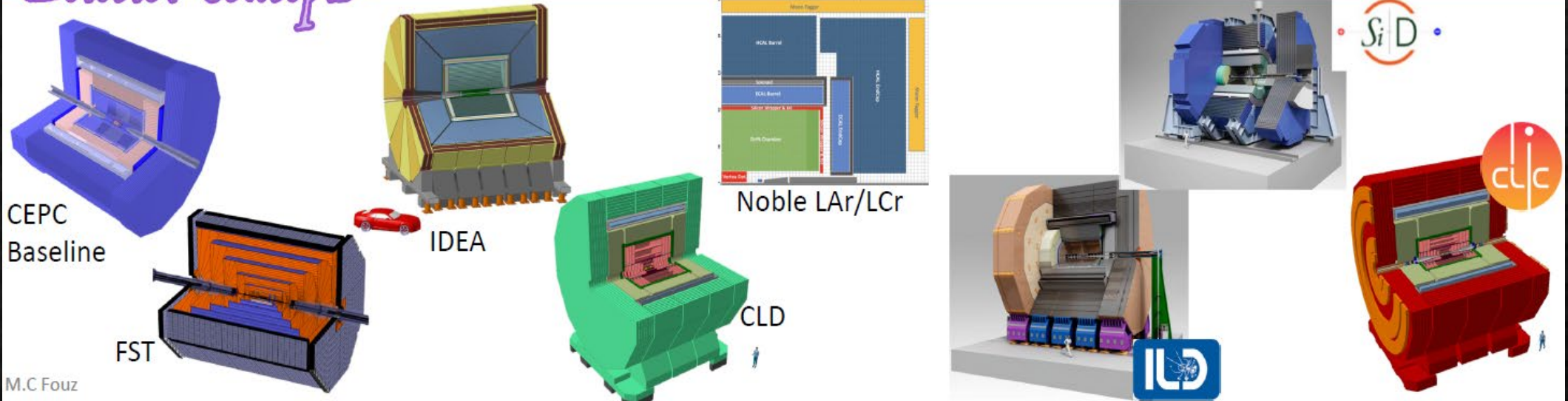
*e+e- colliders*

*Circular*

*Linear*



*Detector Concepts*



M.C Fouz

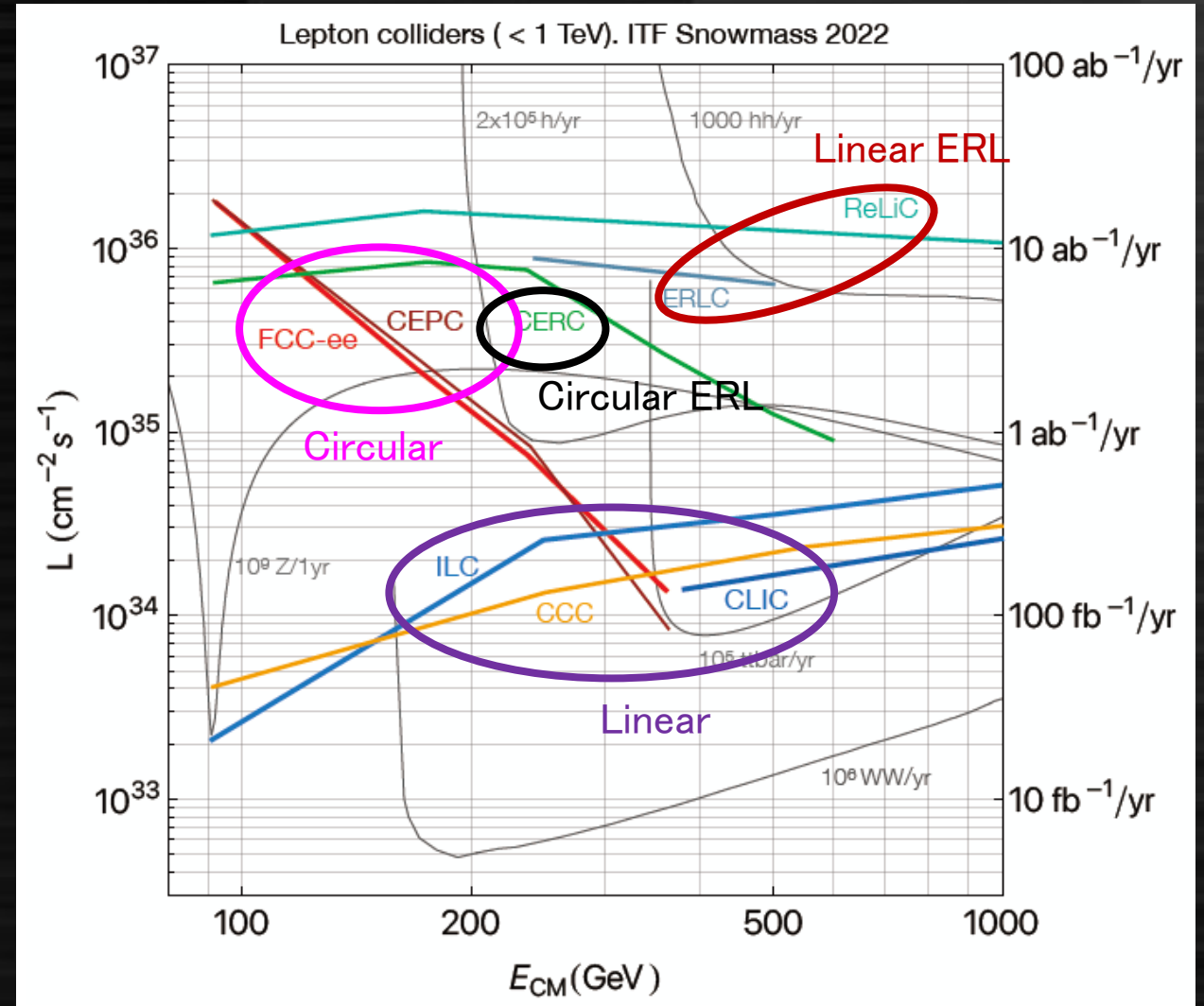
# ILCと他の計画の比較

- 線形 vs 円形
  - 線形: エネルギー拡張性, 経済性 (~factor 2), 偏極に利点
  - 円形: luminosity (250 GeV以下), 複数衝突点, ハドロンコライダーへの転換に利点 (国内で100kmはほぼ不可能)
- ILCと他の線形コライダー (ie. 超伝導 vs 常伝導)
  - 超伝導: mature design, luminosityが出やすい, 電力がやや有利
  - 常伝導: advanced design, gradientが出やすい, 建設費がやや有利 (やや: order 10%, 誤差の範囲?)

250 GeV HFとして現在(地政学的条件を無視すると)ILCは最適に思える  
→ 250 GeV Higgs factoryはどのくらい重要か? (後で議論します)

# Circular and Linear collider?

- Luminosity @ 240/250 GeV
  - A few times higher at circular colliders
- Luminosity @ 350 GeV
  - Less efficient with circular
- Polarization
  - Obvious in LC
  - Not excluded but not guaranteed in circular
- Self coupling,  $ttH$ 
  - Indirect only in circular



# ECFA Higgs factory studies

ECFA

European Committee for Future Accelerators

ECFA workshops on  
e+e- Higgs/EW/Top  
factory

## Overview

Based on the recommendations of the European Strategy for Particle Physics Update, the European Committee for Future Accelerators (ECFA) has launched a series of workshops on physics studies, experiment design, and detector technologies towards a future electron-positron Higgs/EW/Top factory. The aim is to bring together the efforts of various e<sup>+</sup>e<sup>-</sup> projects, to share challenges and expertise, to explore synergies, and to respond coherently to this high-priority strategy item.

To set up the relevant structures and to define a path towards such workshops, an [International Advisory Committee \(IAC\)](#) was formed, which established three Working Groups led by conveners from both experiment and theory:

### WG 1: Physics Potential

Conveners: Patrick Koppenburg (NIKHEF), Jenny List (DESY), Fabio Maltoni (UC Louvain / Bologna) and Jorge de Blas (Univ. Granada)

[More information on WG 1 activities](#)

### WG 2: Physics Analysis Methods

Conveners: Patrizia Azzi (INFN-Padova / CERN), Fulvio Piccinini (INFN Pavia) and Dirk Zerwas (IJCLab/DMLab)

[More information on WG2 activities](#)

### WG 3: Detector R&D

Conveners: Mary Cruz Fouz (CIEMAT Madrid), Giovanni Marchiori (APC Paris), Felix Sefkow (DESY)

[More information on WG3 activities](#)

While the first two working groups began their work in spring 2021, the third one was formed later, after finalisation of the [ECFA Detector R&D Roadmap](#).

Higgs factoryの物理/測定器は共通点が多い。  
→ ECFAの旗振りで共通の物理/測定器の課題に取り組む。

- Workshop  
年1回の全体会議、複数回のtopical会議

<https://indico.in2p3.fr/event/32629/>

- Working groups  
Physics, Analysis, Detector
- Focused topics

16のphysics targetに対して理論、解析、測定器のexpertを集めて議論  
2024年末にreportにまとめる



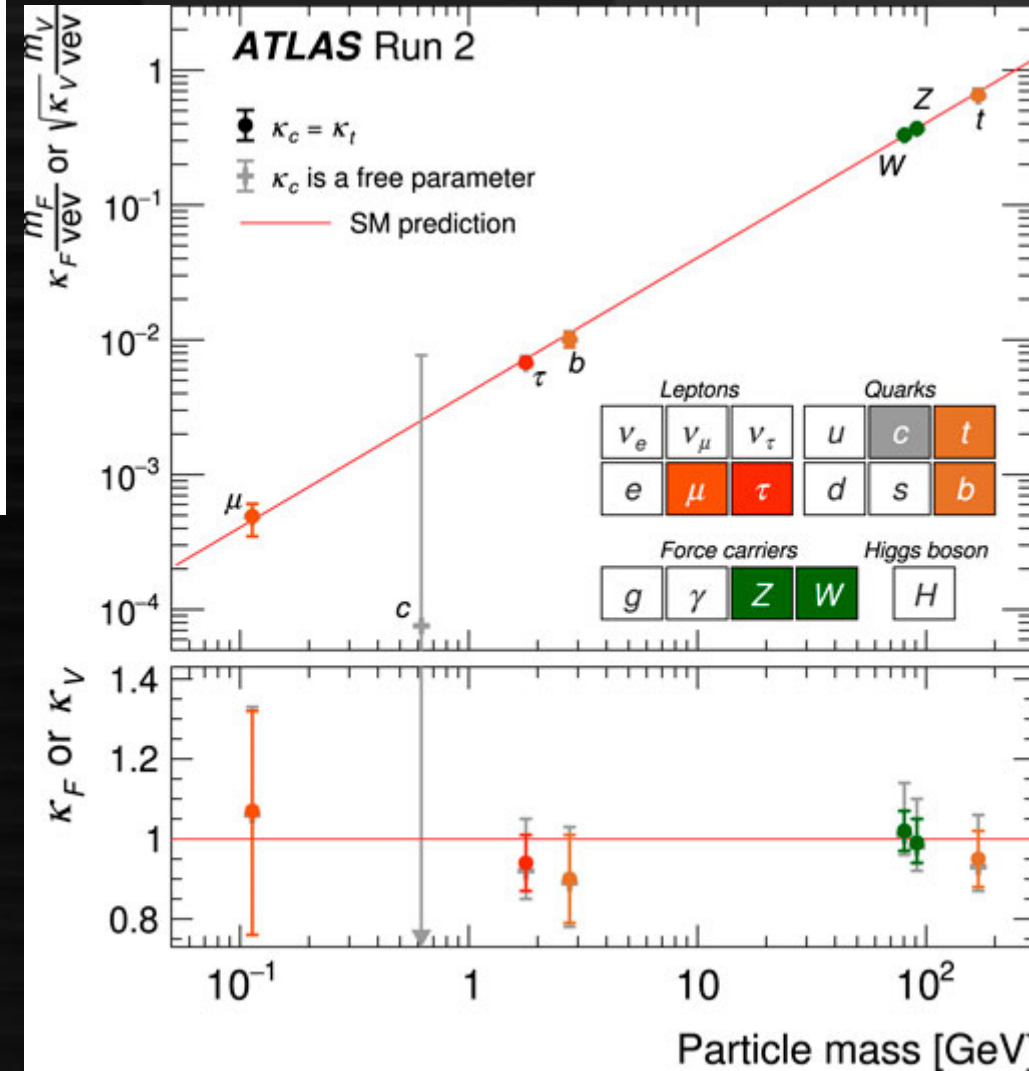
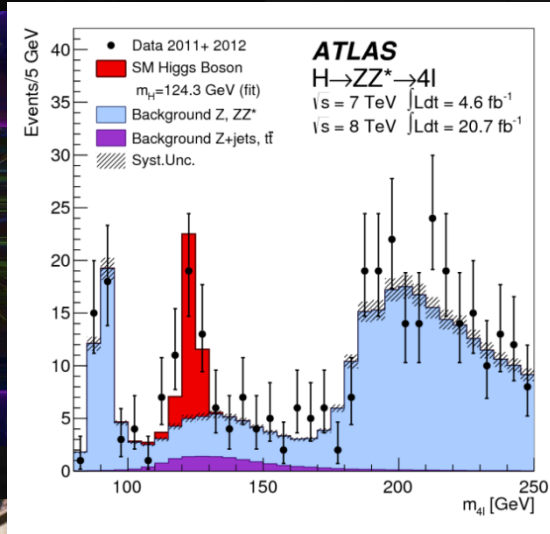
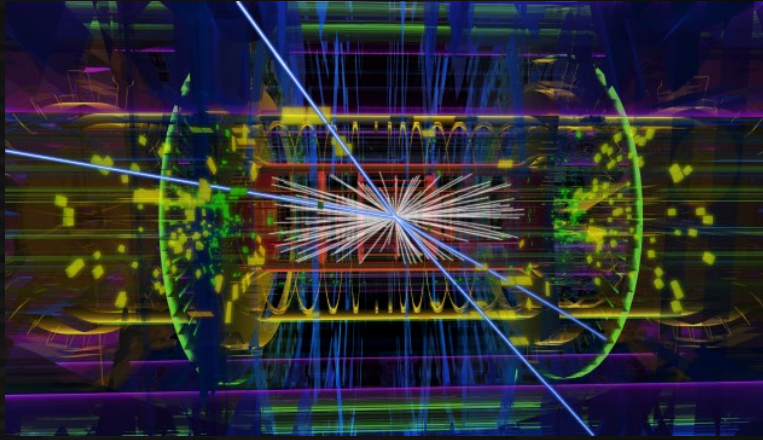
- ECFA detector R&D effort  
technology別のDRD collaboration (2024-)

# 電子・陽電子 Target Energies





# Higgs @ LHC



O(10%)の結合  
定数測定  
SMと無矛盾

HL-LHCで  
数%まで向上  
(ただしモデル  
による)



2013年、ヒッグス、  
アンゲール両氏が  
ノーベル物理学賞受賞

# Higgsは新物理の窓

GeV world  
SMが有効理論

湯川力  
Fermionの質量生成

TeV world  
SM相互作用は  
 $E^{-2}$ で減少  
新物理が本質

Electroweak  
symmetry breaking

標準理論の最後の  
本質的要素



Higgs boson

ヒッグスカ  
ヒッグス真空凝縮  
の直接的な証拠

Higgsへの疑問

- Naturalness
- Composite Higgs?
- Multiple Higgs?

Dark  
Matter?

BSM  
(SUSY?)

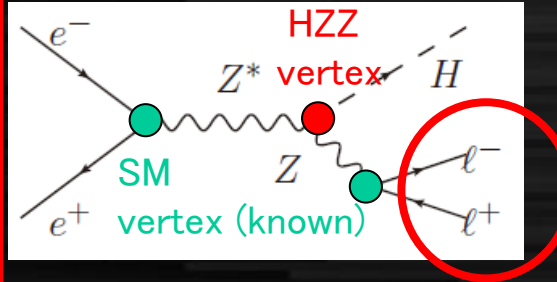
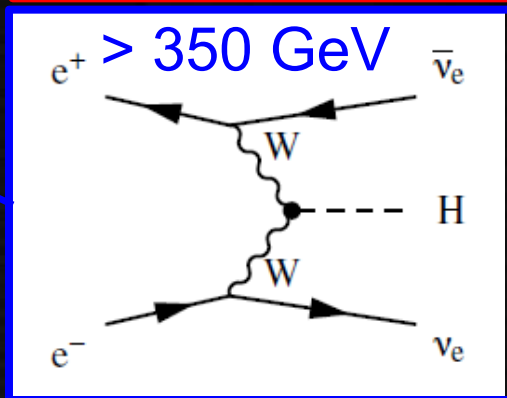
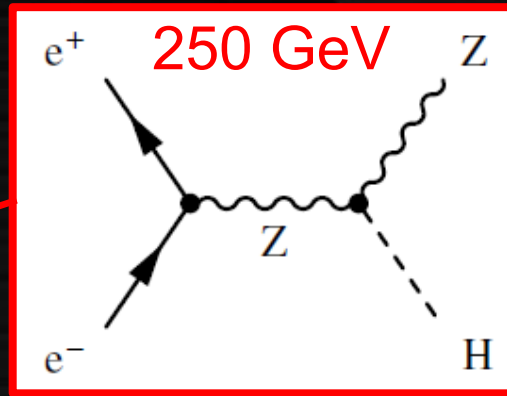
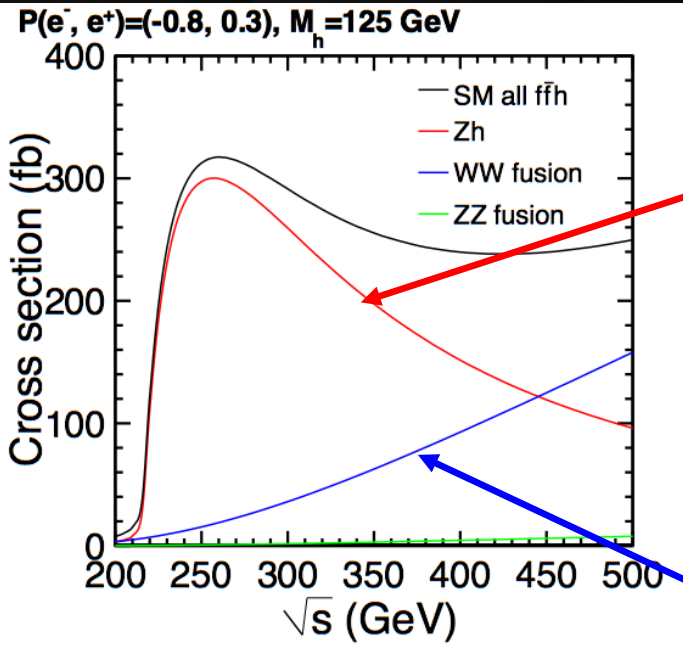
Baryon  
Asymmetry?

Neutrino  
mass?

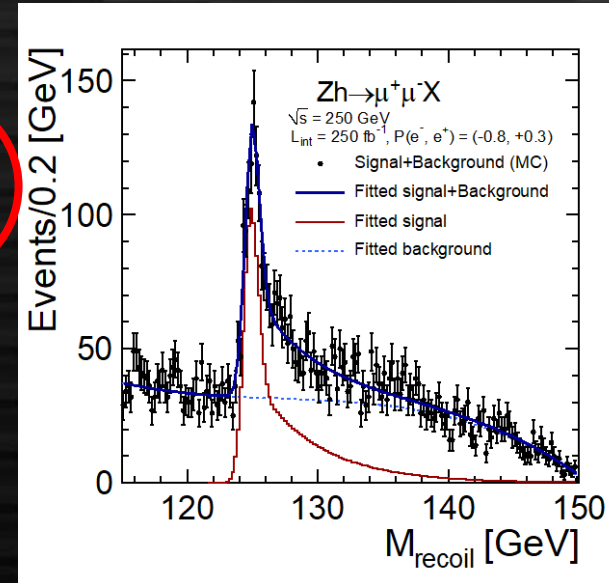
Inflation?

# Higgsの生成過程と全断面積・質量測定

## ZH全断面積・質量測定



$$m_h = \sqrt{E_h^2 - p_h^2}$$



Zの四元運動量と  
初期条件から

Hの四元運動量 → Hの質量が求まる  
イベント数からHの崩壊モード非依存に  
全断面積( $\propto$ HZZ結合定数)が求まる

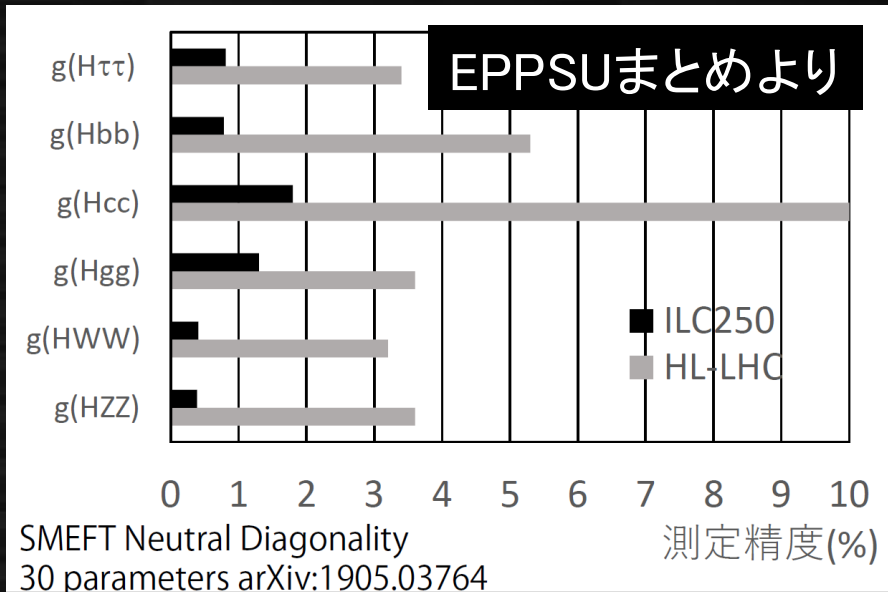
$$\sigma_{ZH} = F_1 \cdot g_{HZZ}^2$$

ZH断面積は250 GeVで最大  
(ILCの偏極で300 fb)  
vvh (t-channel)は350 GeVから測定可能  
> 450 GeVでdominant

# Higgs結合の精密測定

## Higgs崩壊モードの分類

- Quark flavor tagging (b/c/g)  
深層学習等でupgradeしたい  
( $H \rightarrow ss$ と $gg$ の分離も)



ざっくり一桁の精度向上が期待される

## 全崩壊幅の決定方法

Recoil mass

$Y_n =$  測定値  $F_n =$  定数 (理論計算可)

$$Y_1 = \sigma_{ZH} = F_1 \cdot g_{HZZ}^2$$

ZH $\rightarrow$ Zbb

$$Y_2 = \sigma_{ZH} \times \text{Br}(H \rightarrow b\bar{b}) = F_2 \cdot \frac{g_{HZZ}^2 g_{Hb\bar{b}}^2}{\Gamma_T}$$

$\nu\nu H \rightarrow \nu\nu bb$

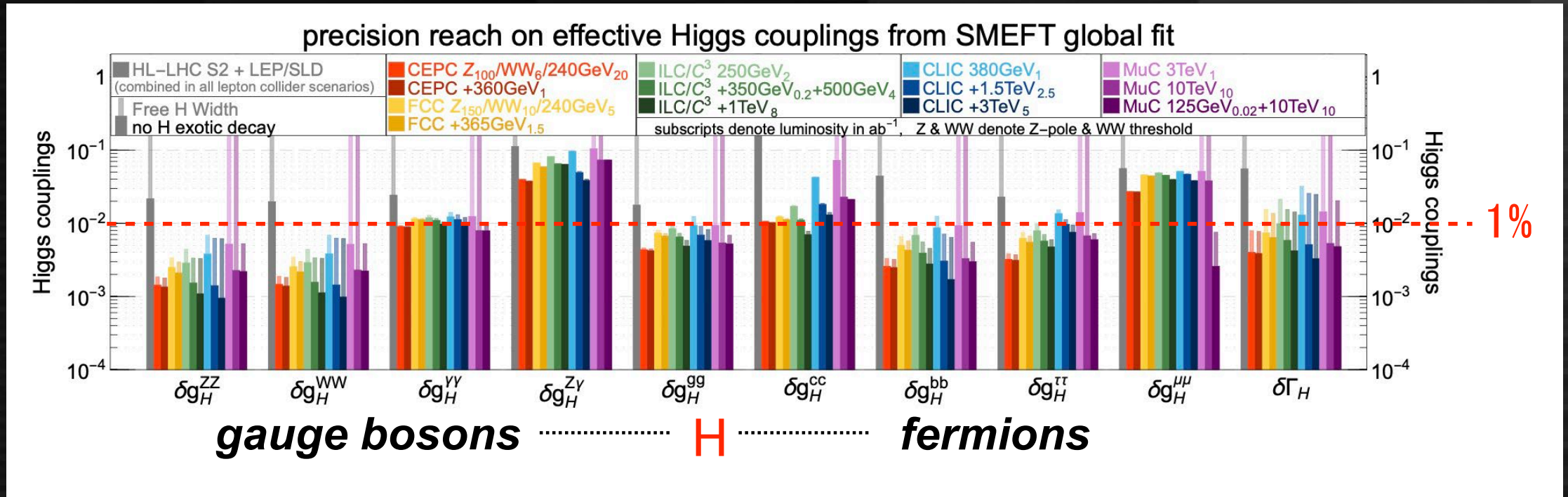
$$Y_3 = \sigma_{\nu\bar{\nu}H} \times \text{Br}(H \rightarrow b\bar{b}) = F_3 \cdot \frac{g_{HWW}^2 g_{Hb\bar{b}}^2}{\Gamma_T}$$

$\nu\nu H \rightarrow \nu\nu WW^*$

$$Y_4 = \sigma_{\nu\bar{\nu}H} \times \text{Br}(H \rightarrow WW^*) = F_4 \cdot \frac{g_{HWW}^4}{\Gamma_T}$$

1.  $Y_1$  から  $g_{HZZ}$  を導出
2.  $Y_1 \times Y_3 / Y_2$  と  $g_{HZZ}$  から  $g_{HWW}$  を導出
3.  $Y_4$  と  $g_{HWW}$  から  $\Gamma_T$  (ヒッグス全崩壊幅) を導出
4.  $Y_2 / Y_3$  と  $g_{HZZ} / g_{HWW}$ ,  $\Gamma_T$  から  $g_{Hb\bar{b}}$  を導出

# Higgs BR measurements

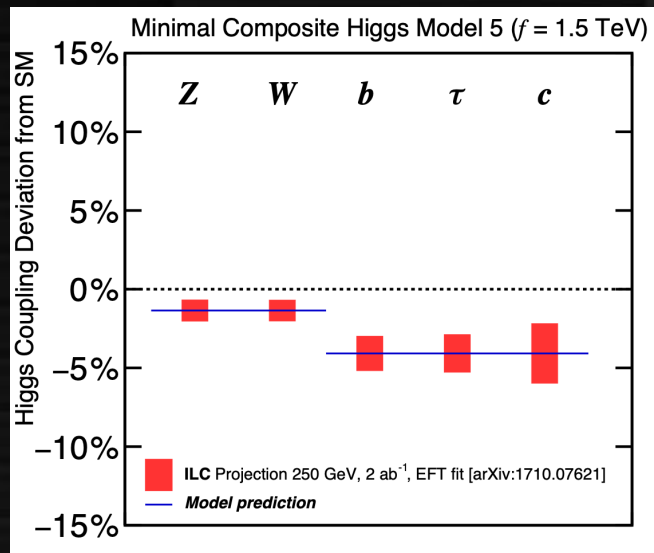
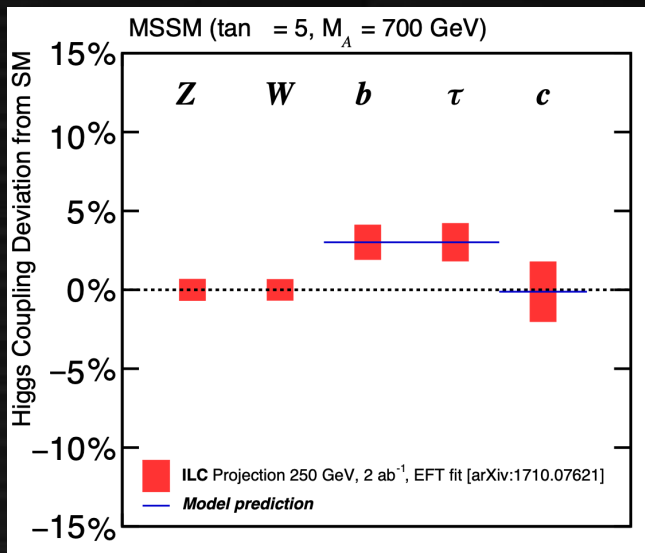


Any HFs: ~1% (or less depending decay channels) BR of dominant decays

- Factor 5-10 improvements from HL-LHC (except  $\mu\mu$  and  $\gamma\gamma$ )  
 → fingerprinting BSM models

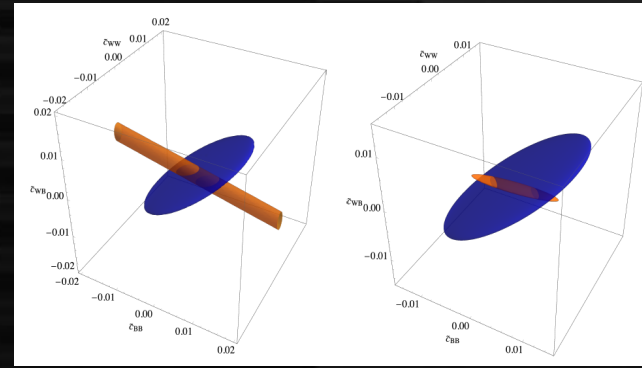
Much more model independent: total cross section, total width,  
 30-param SMEFT with various electroweak precision measurements

# Higgs結合によるBSMの識別



## HiggsのCP property測定

Higgsの崩壊角分布からCP mixtureを検証。様々なモードで異なった感度がある  
HL-LHCと $e^+e^-$ は相補的な感度

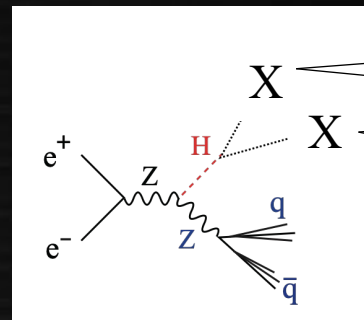
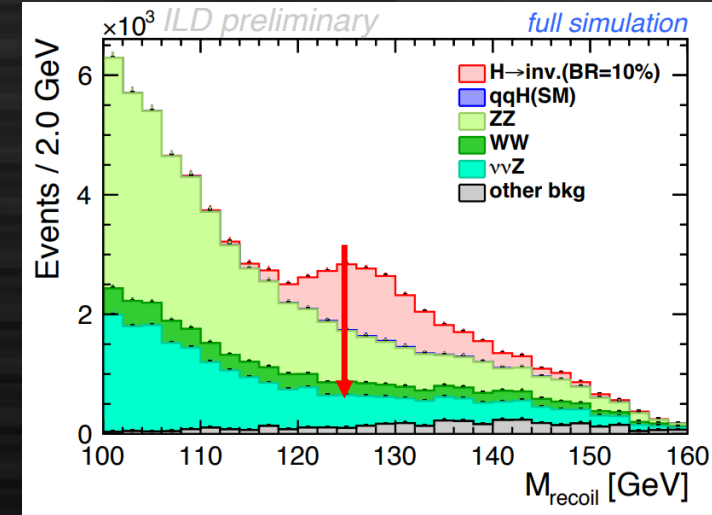
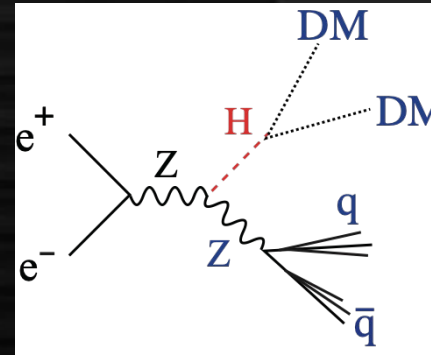


SMEFTによるCPV operatorの感度。青がHL-LHC, オレンジがILC250

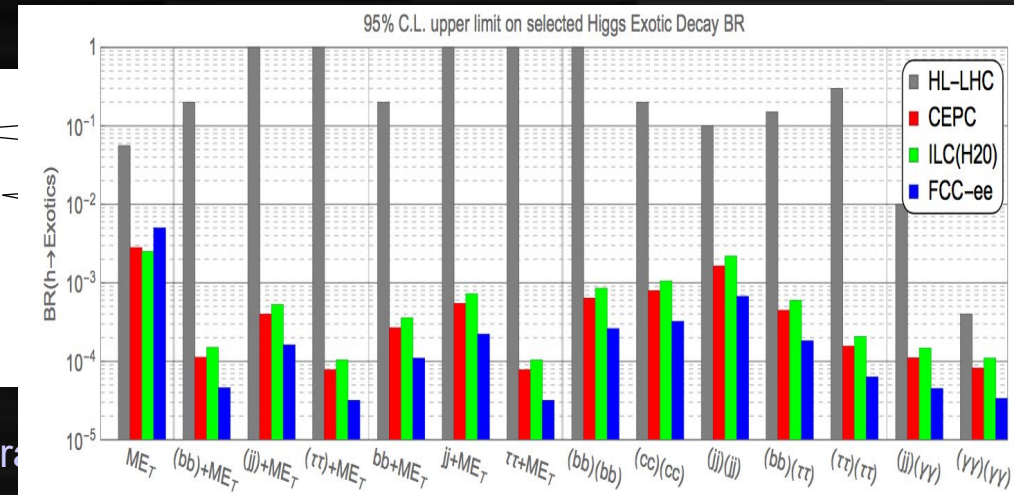
EPPSU Physics bookの議論では、Higgsの量子補正  $\Delta m_H$  とHiggs結合定数について  $m_H^2/\Delta m_H^2 \sim \delta g_h/g_h$  という関係が期待されるとしている。  
 $\Delta m_H$  が新物理スケールだと思えば、1%のcoupling測定が $\sim 1(.25)$  TeVの新物理に対応  
つまり0(%)の結合定数測定は1 TeVの新物理の間接探索になる。

# Higgsと軽い新物理

- LHCでTeV新物理が見えないため  $m_H$  以下の新物理 (GeV, MeV DM) への関心増
- Higgs DM対崩壊
  - ZH 反跳質量で探索 ( $Z \rightarrow qq$ )  
0.1%程度のBRを探索可能
- Higgs exotic崩壊 “Higgsポータル”
  - Higgsのみと結合する新物理
  - Higgs  $\rightarrow XX \rightarrow xxxx$  (SM粒子 or DM)
  - 0.01 – 0.1% BRに感度



Taikan Suehara



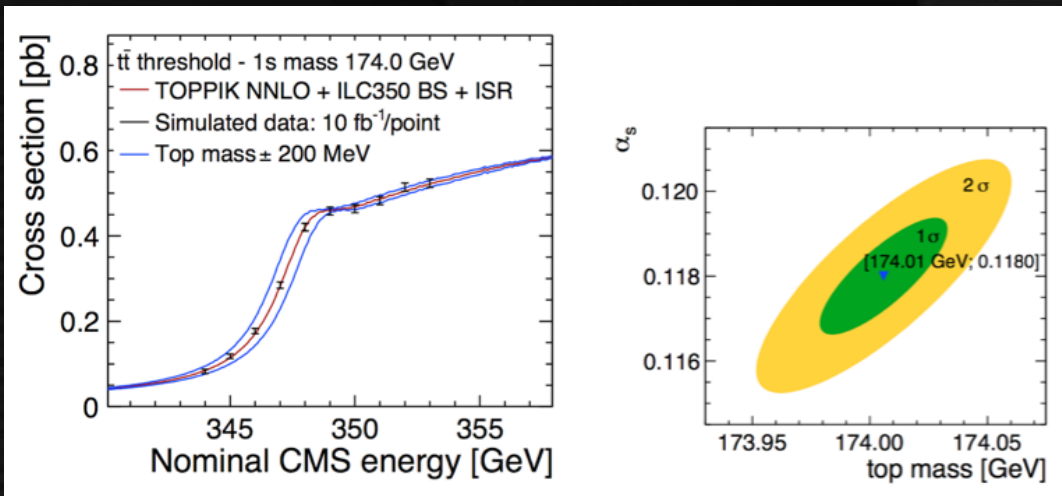
# フレーバーに関する話題

- FCC@Z-poleが**b/τ**のphysicsができることは知られている
  - ILC@Z-poleはluminosityが足りないのでrare decayはあまりできない
- ILCでもできる**flavor**物理
  - $H \rightarrow bs, \tau\mu$  (特にbsはLHCでは困難)
  - W inclusive hadronic BR  $\rightarrow$  CKM unitarity (LEPでb-factoryと同等?)

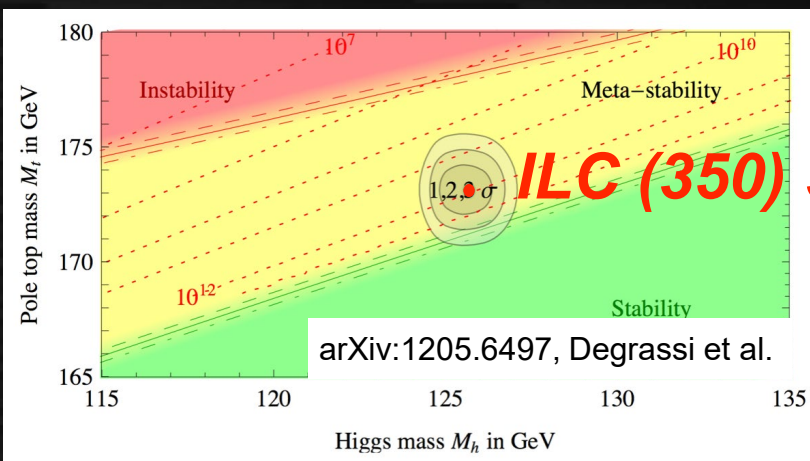
$\Gamma(W^+ \rightarrow \text{hadrons})/\Gamma_{\text{total}}$					$\Gamma_b/\Gamma$
OUR FIT value is obtained by a fit to the lepton branching ratio data assuming lepton universality.					
					<b>LHCはsystematic dominant</b>
VALUE ( $10^{-2}$ )	EVTS	DOCUMENT ID	TECN	COMMENT	
<b>67.41 ± 0.27</b>				OUR FIT	
67.32 ± 0.02 ± 0.23		TUMASYAN	2022F	CMS	$E_{\text{cm}}^{pp} = 13 \text{ TeV}$
67.41 ± 0.37 ± 0.23	16438	ABBIENDI	2007A	OPAL	$E_{\text{cm}}^{ee} = 161 - 209 \text{ GeV}$
67.45 ± 0.41 ± 0.24	13600	ABDALLAH	2004G	DLPH	$E_{\text{cm}}^{ee} = 161 - 209 \text{ GeV}$
67.50 ± 0.42 ± 0.30	11246	ACHARD	2004J	L3	$E_{\text{cm}}^{ee} = 161 - 209 \text{ GeV}$
67.13 ± 0.37 ± 0.15	16116	SCHAEEL	2004A	ALEP	$E_{\text{cm}}^{ee} = 183 - 209 \text{ GeV}$



# Top 質量/結合 精密測定



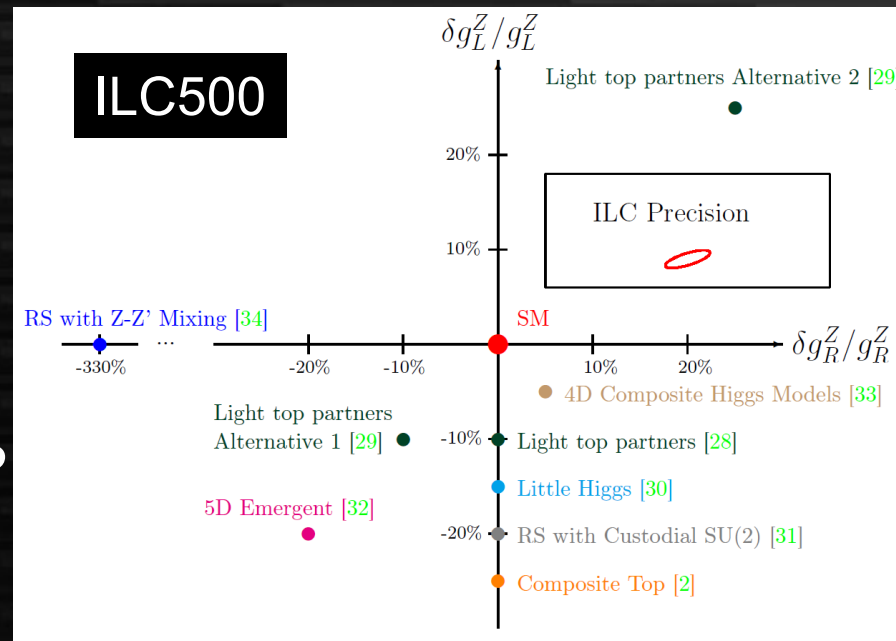
Threshold scanによるtopの精密測定 MSbarに直接変換できる「理論的に扱いやすい」質量を直接求められる



$$\Delta m_t(\overline{MS}) \lesssim 50 \text{ MeV}$$

$$\Delta m_h \simeq 14 \text{ MeV}$$

$\alpha_s$  や崩壊幅にも感度あり

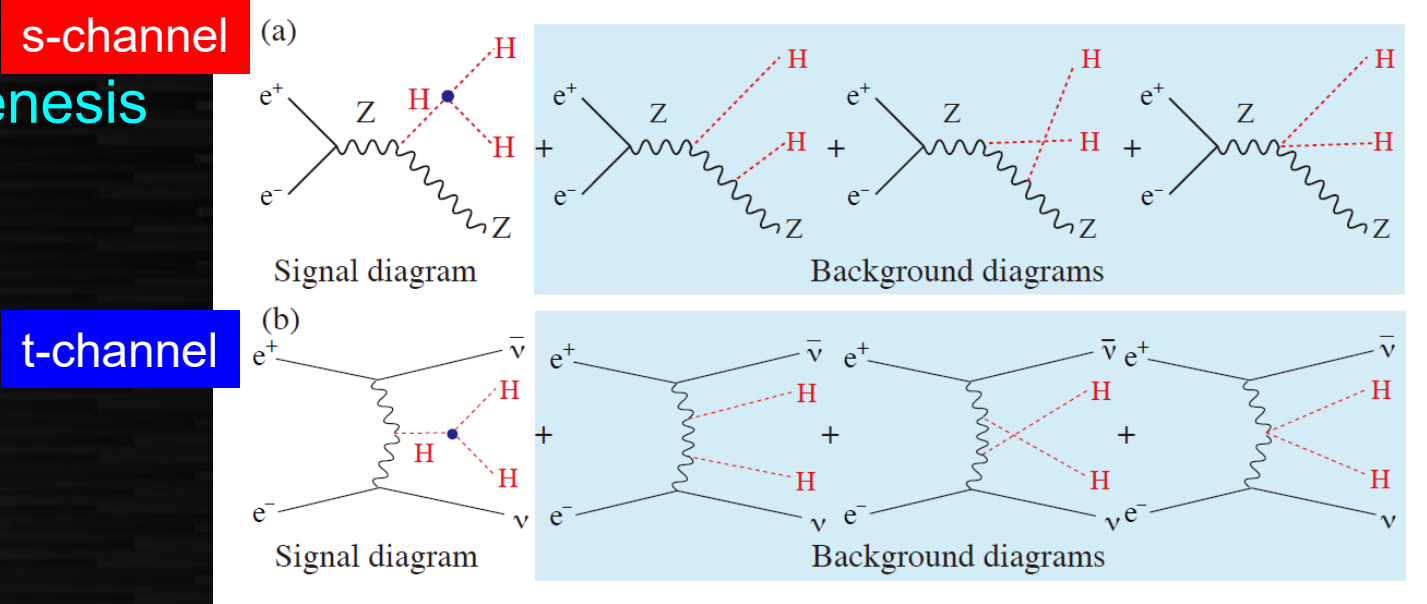
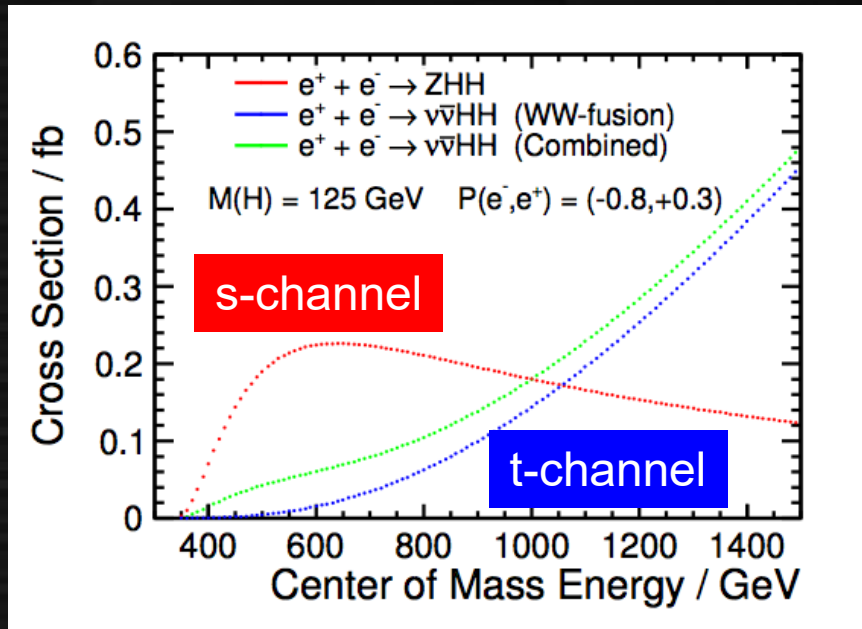


偏極を用いて左巻き、右巻きの結合定数を求め、Topが関係する新物理の探索・モデル識別が可能

# Higgs self coupling

$$V(\eta_H) = \frac{1}{2}m_H^2\eta_H^2 + \lambda v\eta_H^3 + \frac{1}{4}\lambda\eta_H^4$$

Direct probe of Higgs potential  
Essential for electroweak baryogenesis  
(1<sup>st</sup> order phase transition requires >10% more I)



Effect of insensitive diagram → next page

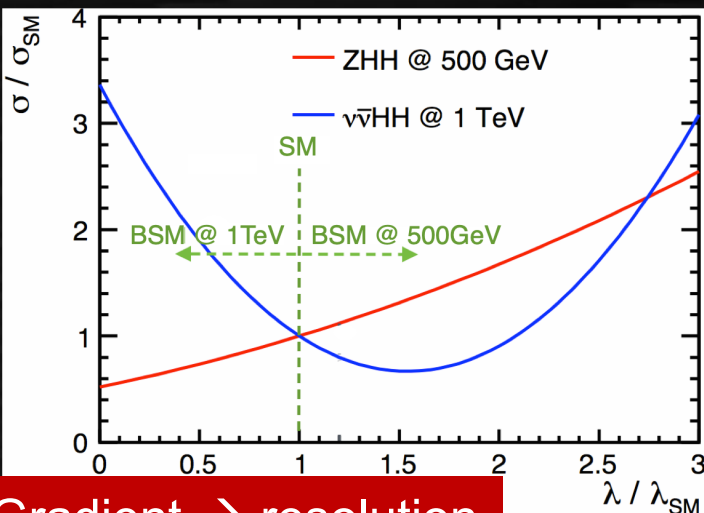
channel	$\sqrt{s}$ [GeV]	L [ab <sup>-1</sup> ]	$\lambda$ precision
s-channel	500	4	27%
t-channel	1000	4	10%

Extremely small cross section:  
O(100) events / ab<sup>-1</sup>

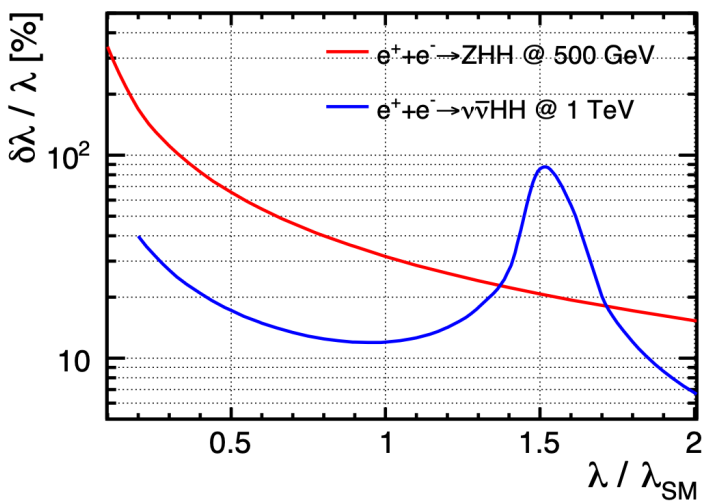
Ultimate precision at linear collider: ~5% at 2-3 TeV

# Higgs self coupling (cont.)

## Effect of interference

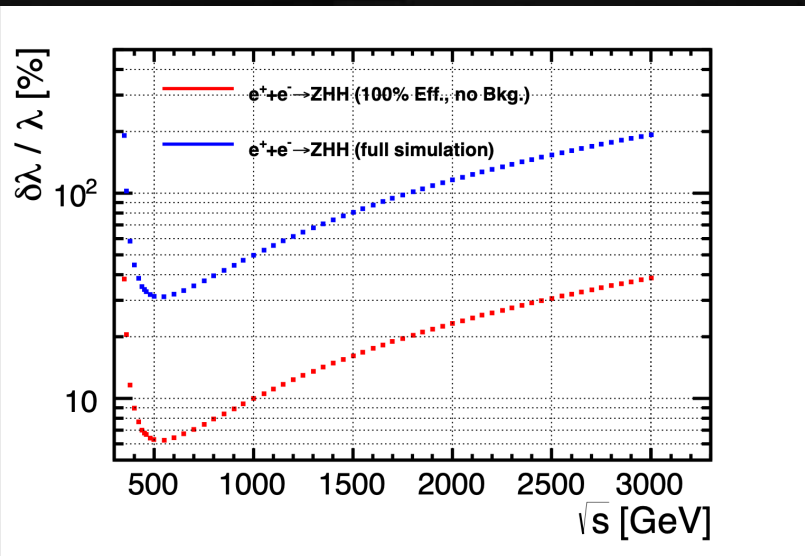


## Gradient $\rightarrow$ resolution



500 GeV: better at higher  $\lambda$  (20% @  $\lambda \sim 1.5$ )  
 1 TeV: best at  $0.8 < \lambda < 1.2$ , insensitive at  $\lambda \sim 1.5$

## Possibility for improvements



Reconstruction of multi-jet environments  
 (Jet energy resolution, flavor tagging)  
 $\rightarrow$  Deep learning based reconstruction  
 Improvements possible but not easy

Self coupling from  
 NLO ZH cross section

$$\sigma_{i,\text{NLO}} = Z_{\text{H}} \sigma_{i,\text{LO}} (1 + \kappa_{\lambda} C_{1,i})$$

Considered in FCC context  
 (since  $> 500$  GeV impossible)

- Loop contribution
- Assuming no BSM loop (qualitatively different from double-Higgs search)

$\rightarrow$   $\sim 30\%$  resolution feasible  
 at 250 GeV (FCCee study)  
 (to be investigated for LC)

# 新物理直接探索

- Compressed spectrum

- 最も軽い新粒子と次に軽い新粒子の質量が縮退するシナリオ

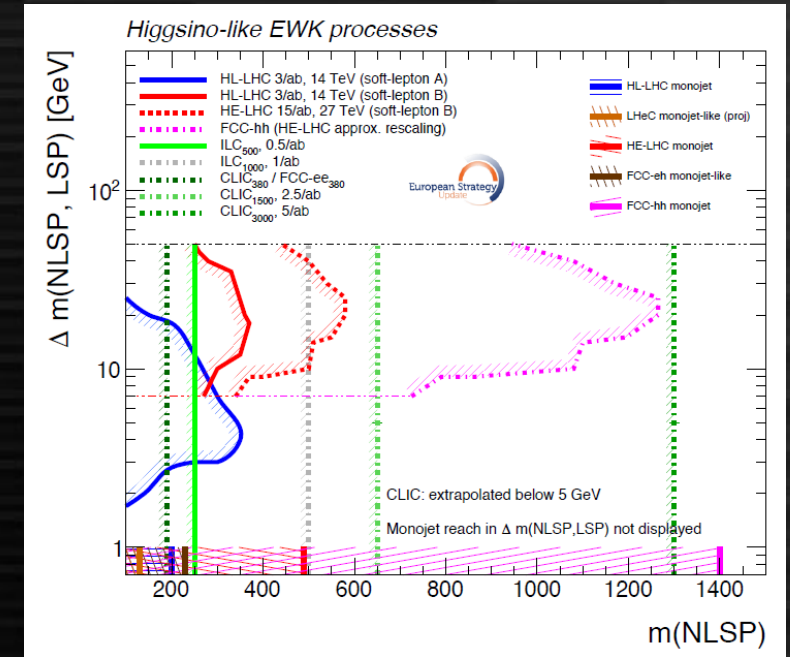
- SUSYではHiggsino, Winoが縮退するため  
他がdecoupleしていると自動的に縮退

- LHCではdisappearing trackなどを使うため寿命に下限(質量差に上限)がつく

- $e^+e^-$ ではsub-GeVのsoft trackをtagできるため  
質量差のギャップを完全に埋められる

- ほぼ $\sqrt{s}/2$ までカバーする

- Naturalnessから要請される100 GeV程度のHiggsinoは250-500 GeVでカバー
- 2-3 TeV LCで1 TeV Higgsino DMを網羅的に探索



Mass splittingが1桁GeV (soft pion)  
はHadron colliderは苦手

# DM探索など

- 暗黒物質対生成

- ISR photonでtag

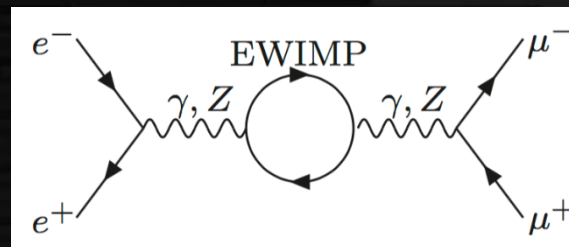
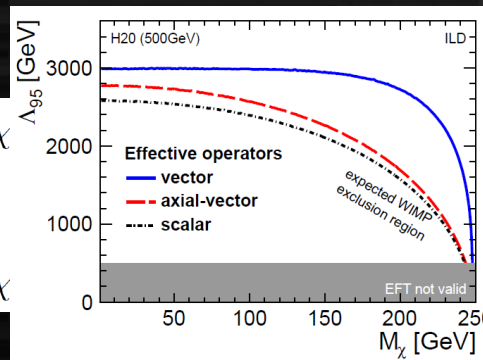
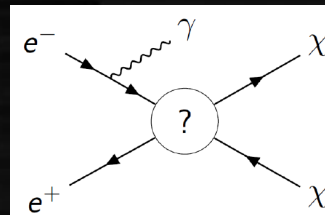
- LHCとは見ている結合が異なる
    - Messenger scaleで数TeVまで探索可能 ( $m_\chi$  はほぼ  $\sqrt{s}/2$  まで)

- 2f精密測定による間接探索

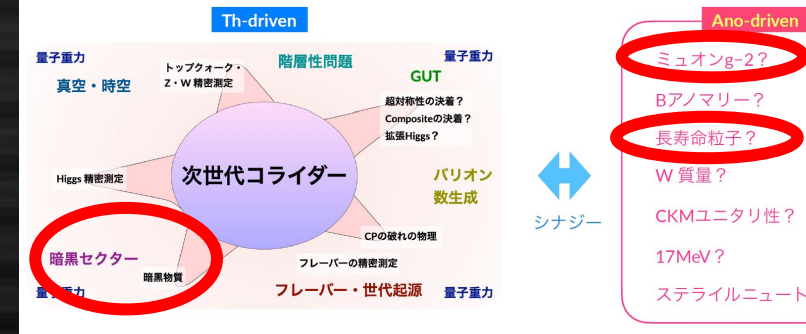
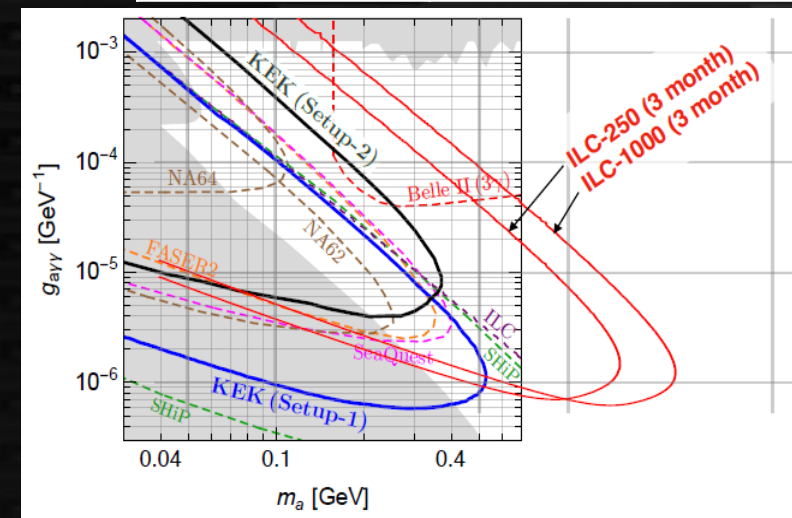
- WIMPがループで入る
  - 直接探索よりやや高い質量まで感度

- 固定標的実験

- 軽いDM探索など

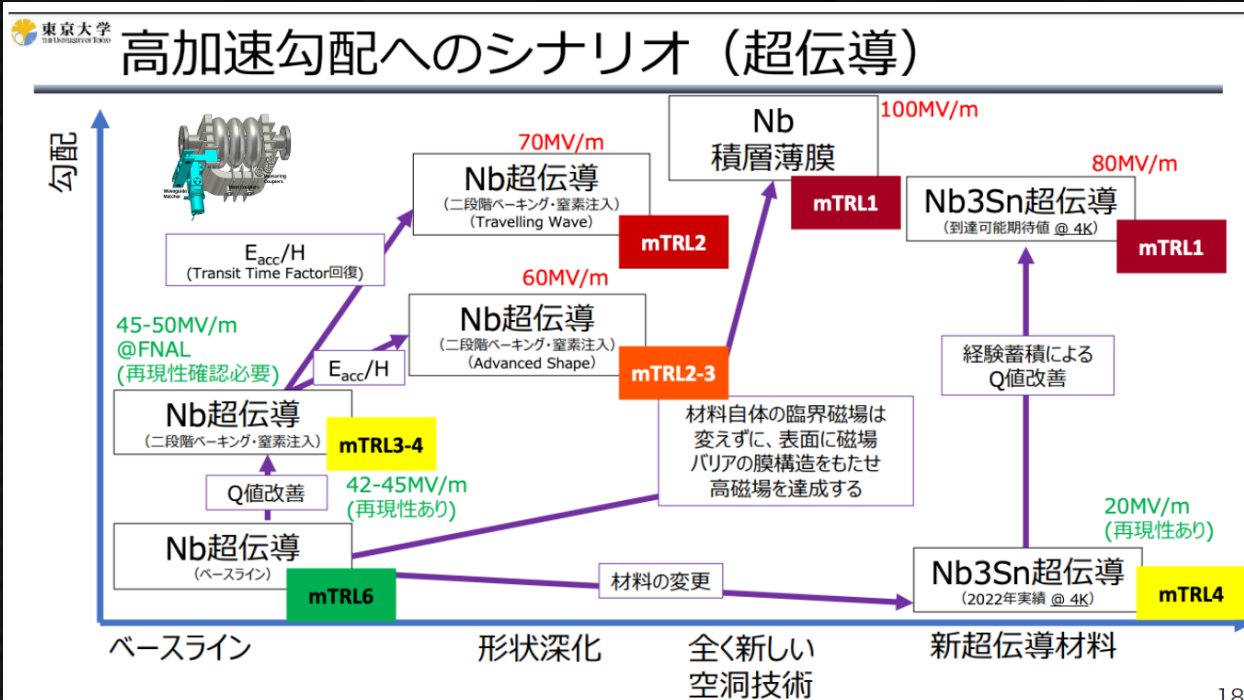


ILC 250 GeV	mass reach (3σ)
Higgsino	150 GeV
MDM	330 GeV
Wino	190 GeV



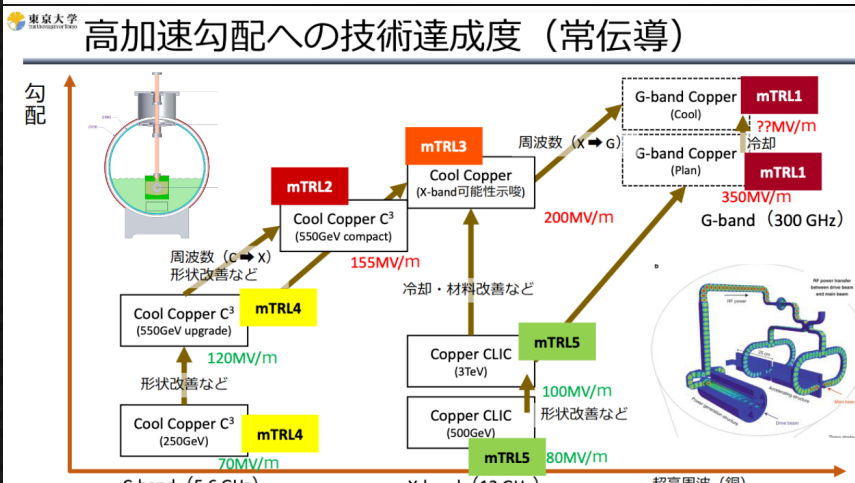
- Ano-driven
- ミューオンg-2?
- Bアノマリー?
- 長寿命粒子?
- W質量?
- CKMユニタリ性?
- 17MeV?
- ステライルニュートリノ

# Multi-TeVコライダーへの見通し



mTRL1	アイデアはあるが未検証。実現性も不透明
mTRL2	アイデアはあるが未検証。実現に向けた道筋は見えている
mTRL3	技術が実験室レベルで検証された
mTRL4	技術がシステムとして再現性を持って検証された
mTRL5	検証されたシステムがコライダーにおける要求を満たすことが確認された
mTRL6	検証されたシステムの量産技術が確立された

超電導、常伝導とも > 100 MV/m への道のりは(一応)存在する (ただし技術が確約されたものではない) → 2-3 TeVコライダーが実現可能

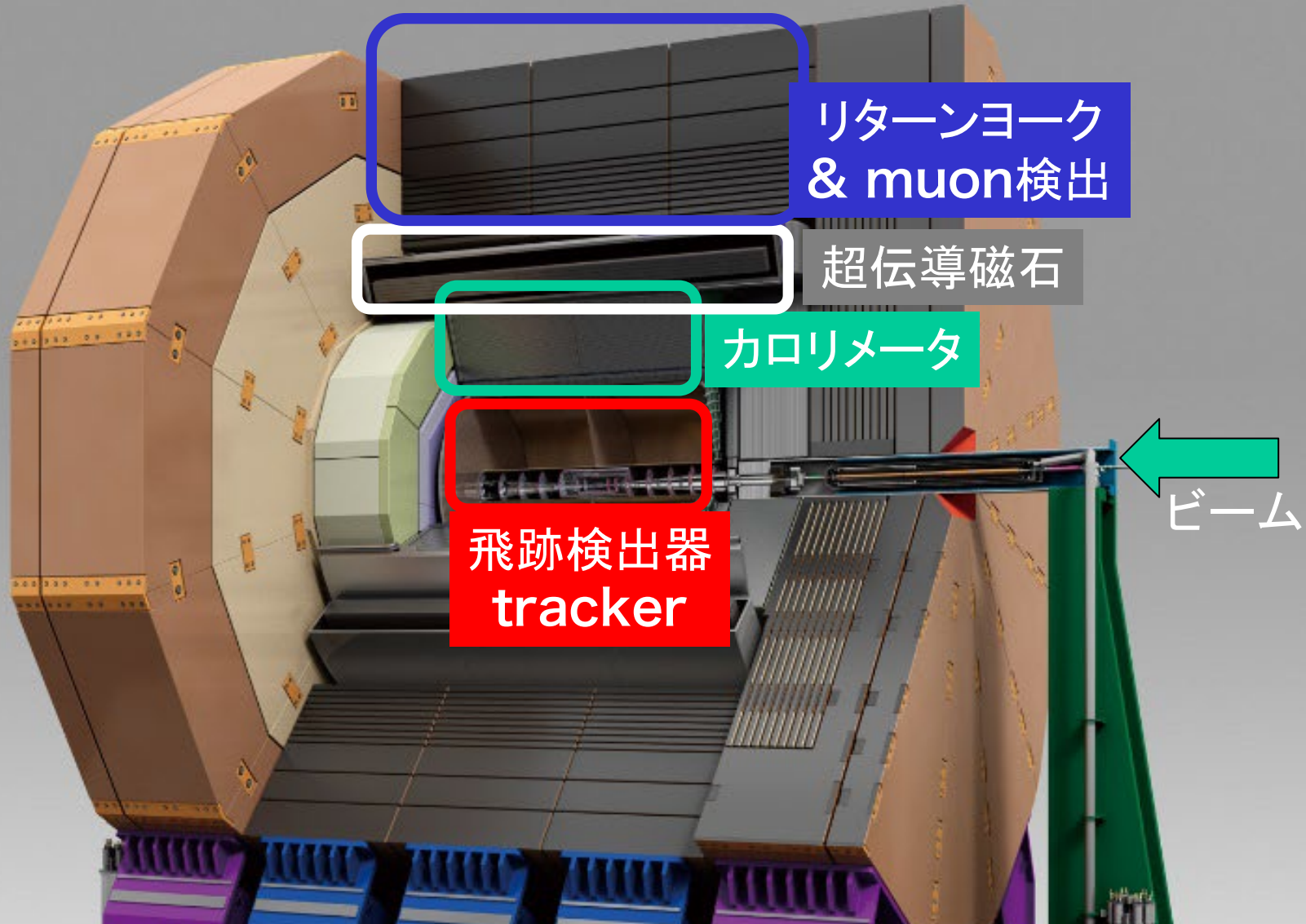


将来計画委員会 加速班のまとめ (坂上さん)

さらに新奇加速 (常伝導の系譜)も考えれば10 TeV級への加速もありえる ただし、luminosityがどの程度得られるか不透明 (3 TeV以上ではbeam-beam効果によりそれ以上収束できない)

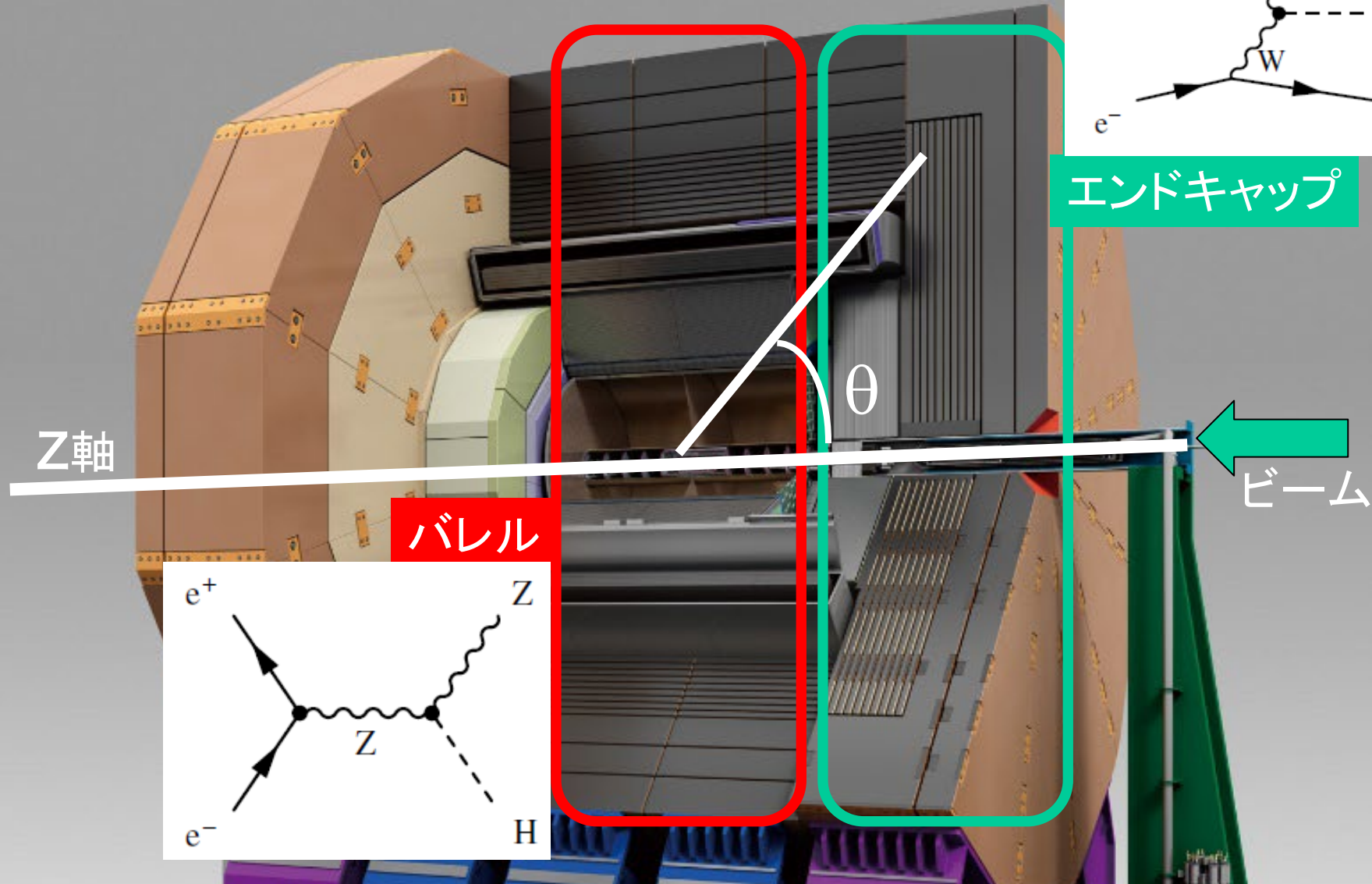
# ILCの測定器

# 測定器の構造





# 測定器の構造



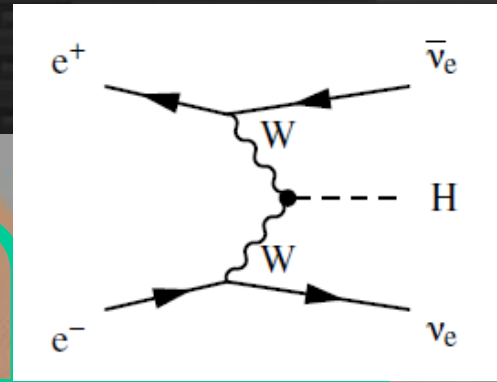
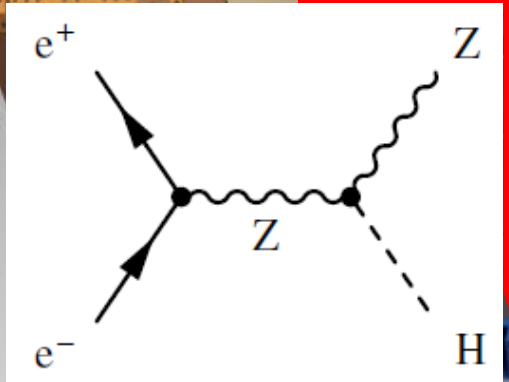
エンドキャップ

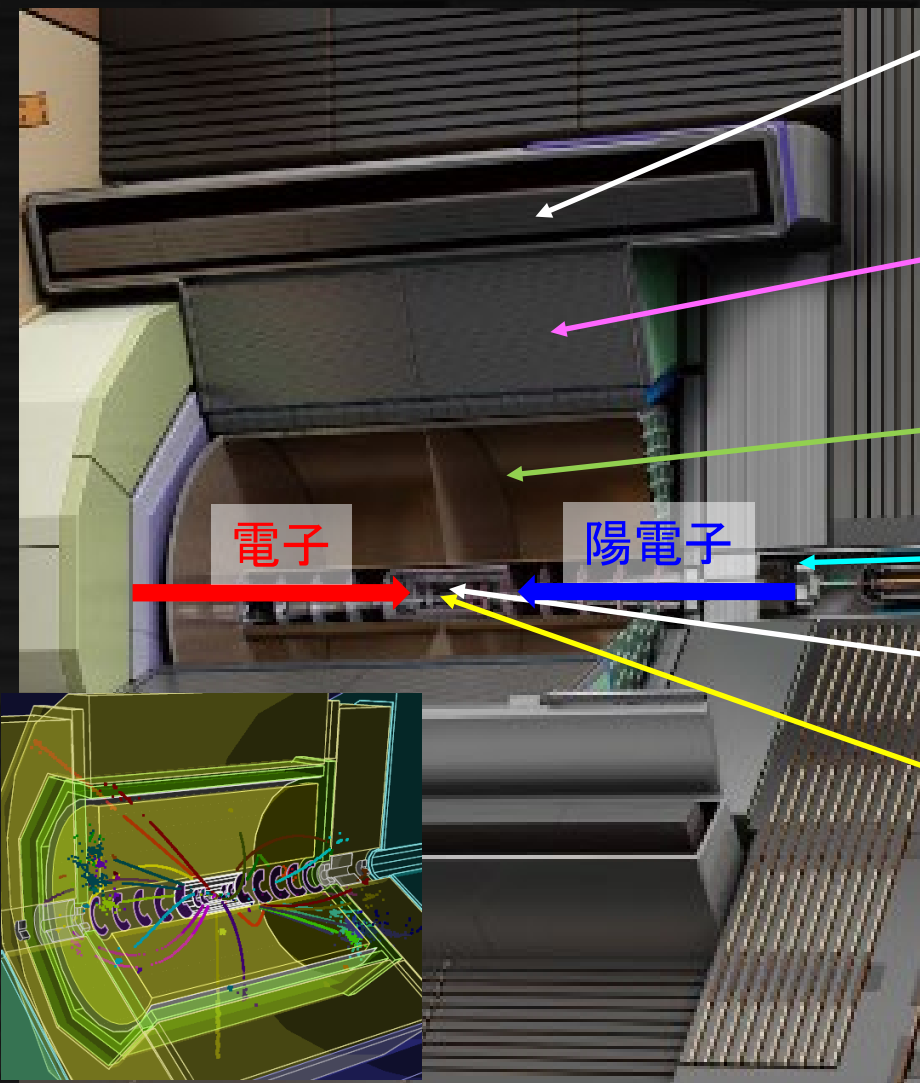
バレル

Z軸

ビーム

$\theta$





超伝導電磁石 (3.5 Tesla)  
強力な磁場で荷電粒子を曲げる

カロリメータ  
中性粒子の位置、エネルギーを測定

ガス検出器(TPC)  
荷電粒子の運動量を正確に測定

ビームパイプ  
シリコン崩壊点検出器・飛跡検出器  
荷電粒子の位置を精密に測定する

衝突点

内側に荷電粒子の検出器、  
外側にカロリメータがある  
得られた粒子の情報から  
元の反応を再構成していく

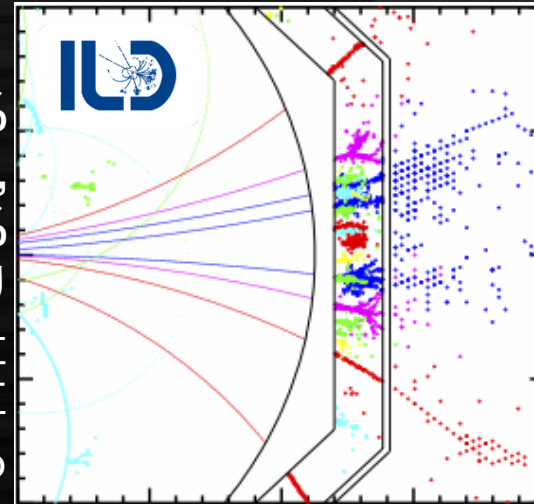
# Particle flow concept

Separating particles inside jets to do track-cluster matching

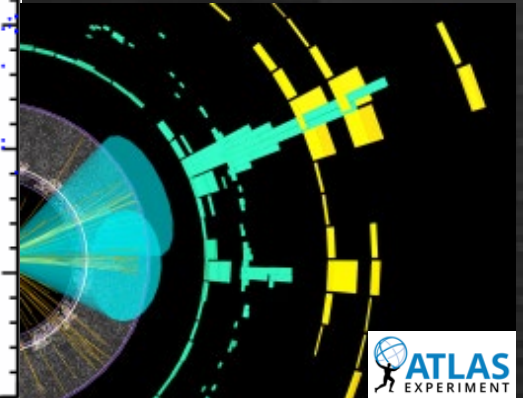
Requiring

- Highly-granular calorimeters
- Intelligent pattern recognition

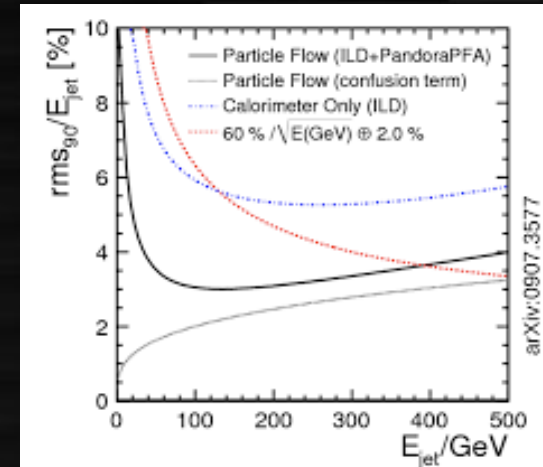
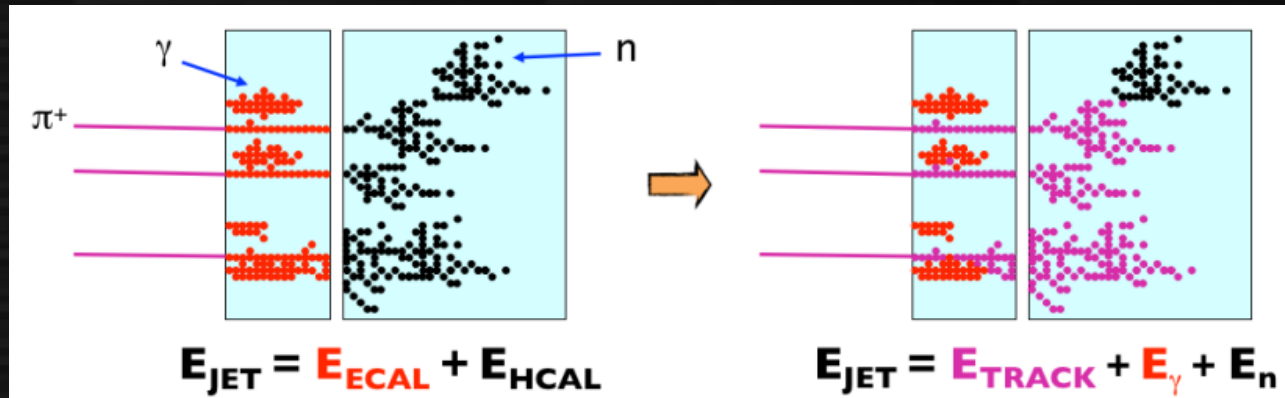
荷電粒子~60%  
光子~30%  
中性ハドロン~10%  
粒子分離により  
荷電粒子の運動量をエネルギー計算に使える



Different granularity on ILD - ATLAS



Developed in ILC, first full application in CMS HGCAL at HL-LHC (partial use already in ATLAS/CMS)

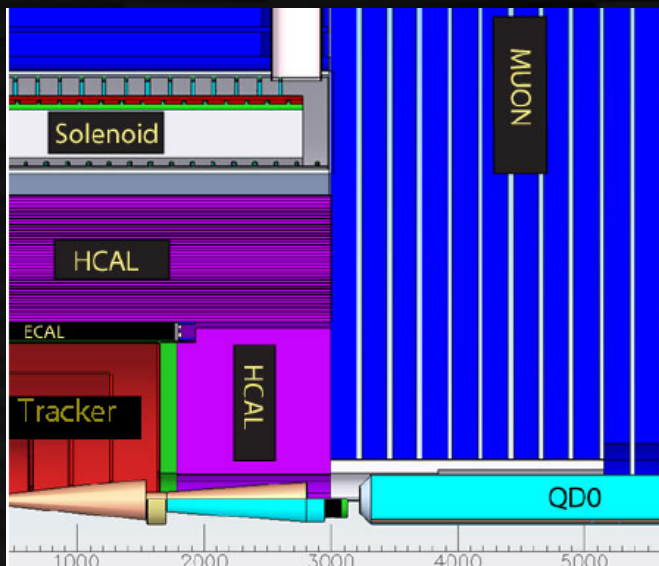
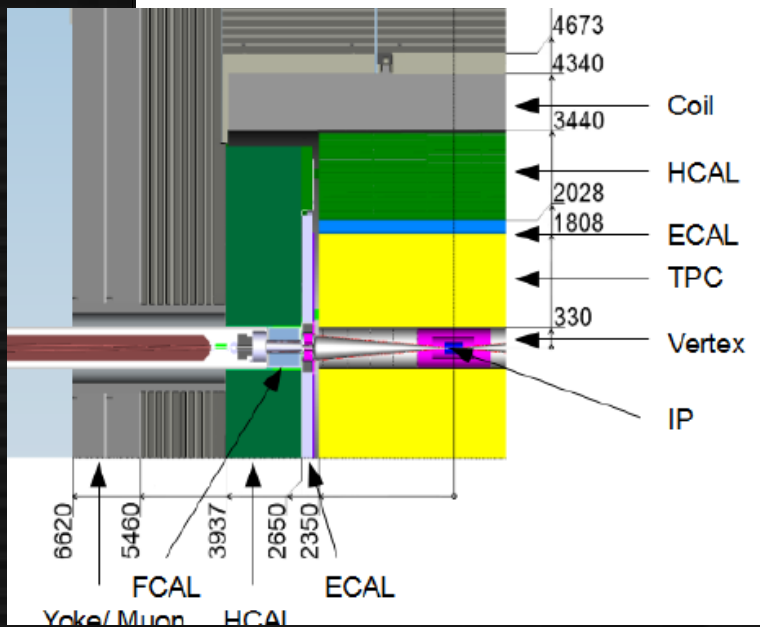
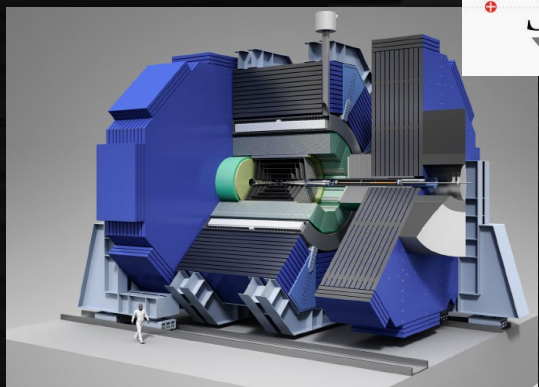
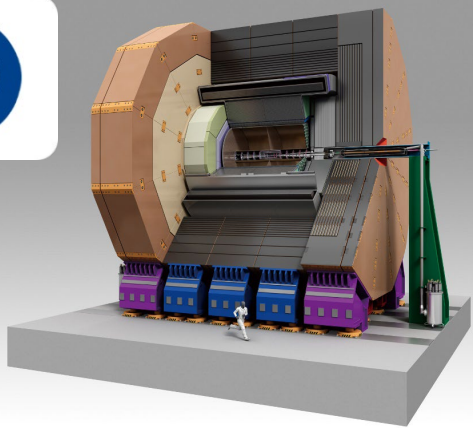


Possible to obtain jet energy resolution of

$$\frac{\delta E_{jet}}{E_{jet}} \approx \frac{30\%}{\sqrt{E_{jet} [GeV]}}$$

~2 times better than calo-only

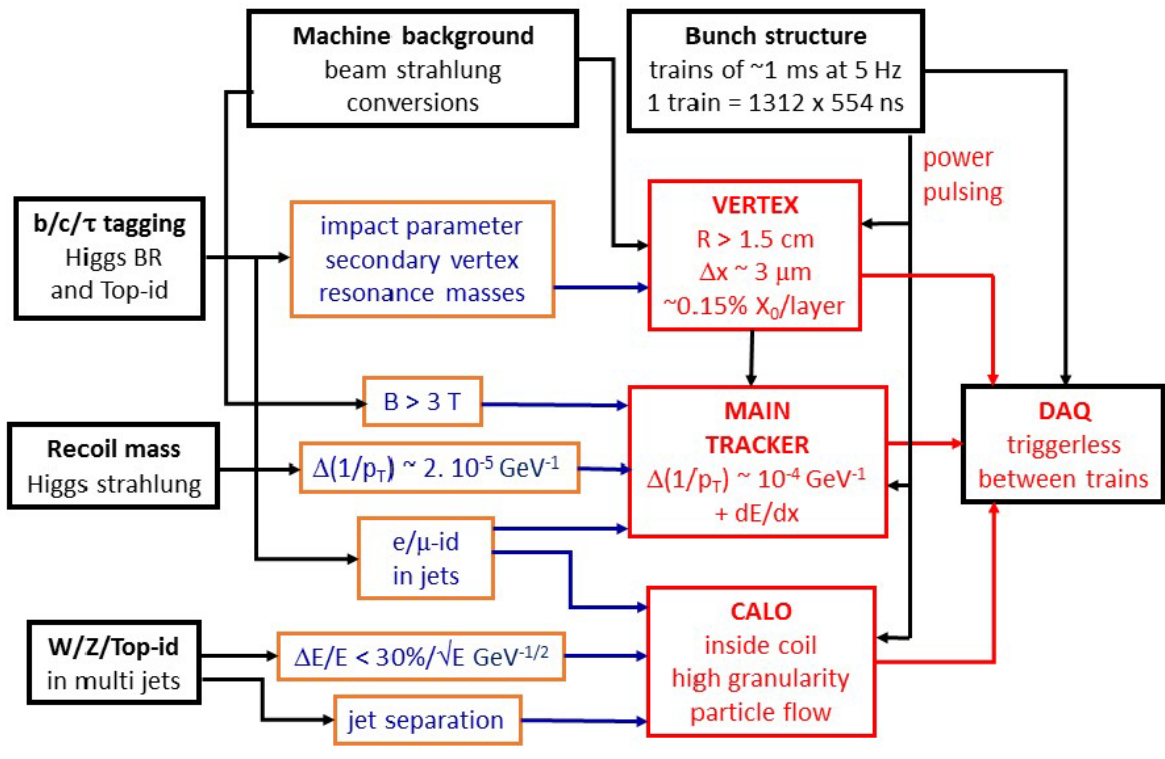
# Detector concepts – particle flow and others



Two (similar) concept based on **Particle Flow** reconstruction  
 Already mature baseline design

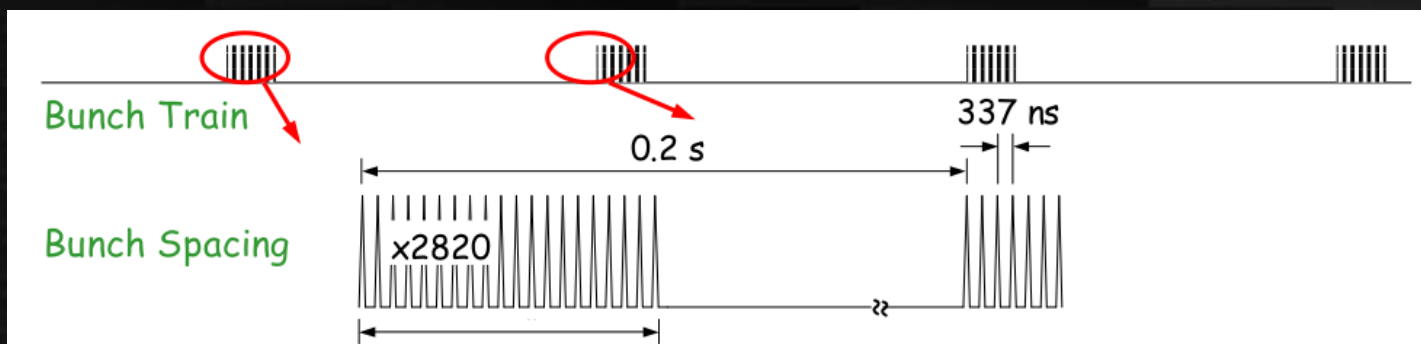
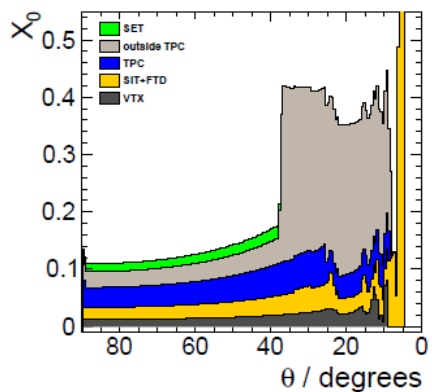
- **Monolithic silicon vertex**
- **Silicon tracker**  
(inner/outer for ILD)
- **Time projection chamber**  
(only for ILD)
- **Highly-granular ECAL/HCAL**  
with several options
  - **Silicon pads**
  - **Scintillator strips/tiles**
  - **Resistive plate chamber**
  - **Silicon pixels (MAPS)**
- **3.5/5T solenoid outside HCA**

# Requirement of ILC detectors



## Power pulsing

- ILCのバンチ構造に合わせて電源(電流)をON/OFFすることで電力消費を減らす  
(1 ms on / 199 ms off)
- カロリメータではASICに機能が搭載されている。  
性能劣化なく運用可能



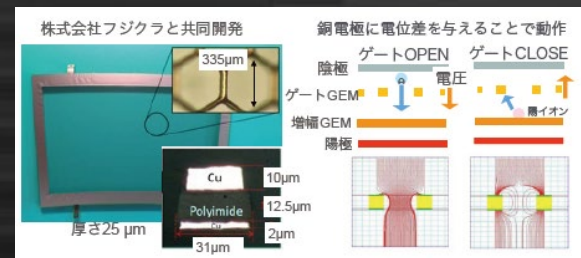
# Tracker options

- Vertex detector: mostly MAPS of ~20  $\mu\text{m}$  pixel size
- Position resolution of a few  $\mu\text{m}$
  - Fast readout to reduce occupancy
  - Low material, cooling

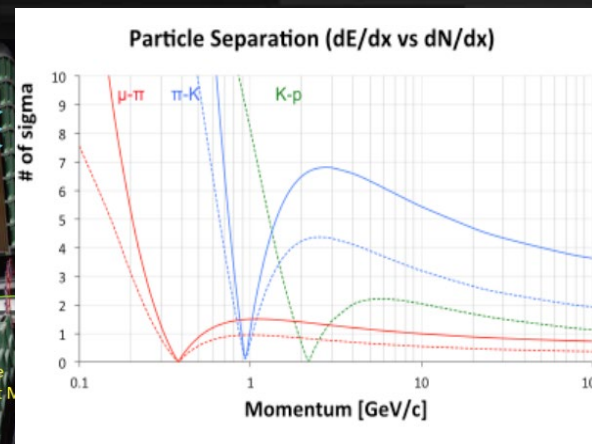
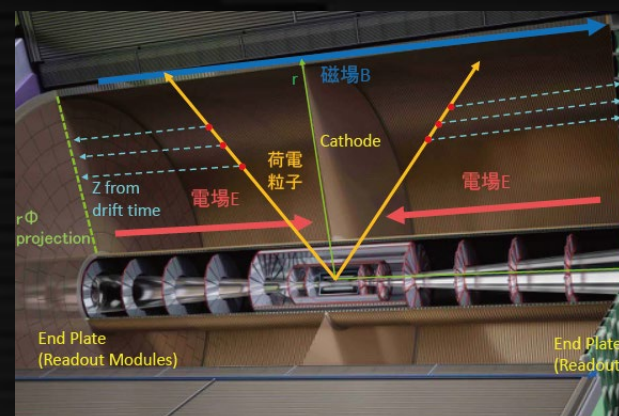
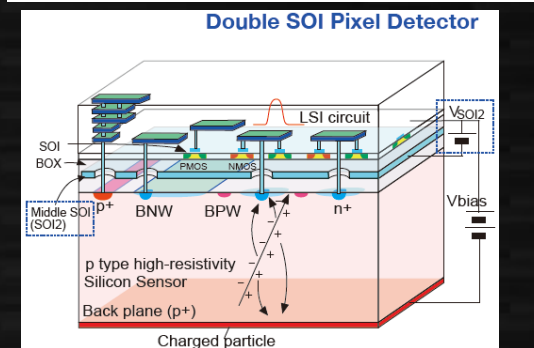
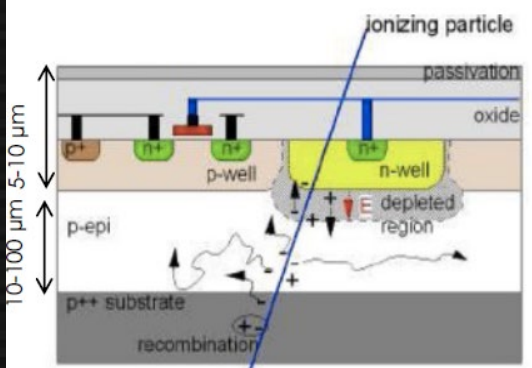
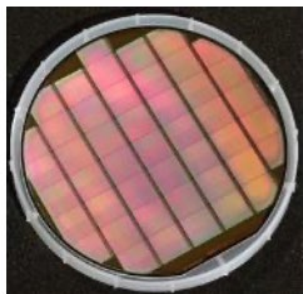
Main tracker options:

- Silicon pixel/strips
- Drift chamber
- Time projection chamber

Gas detector has advantage on PID and continuous tracking while single point resolution is better with silicon sensors



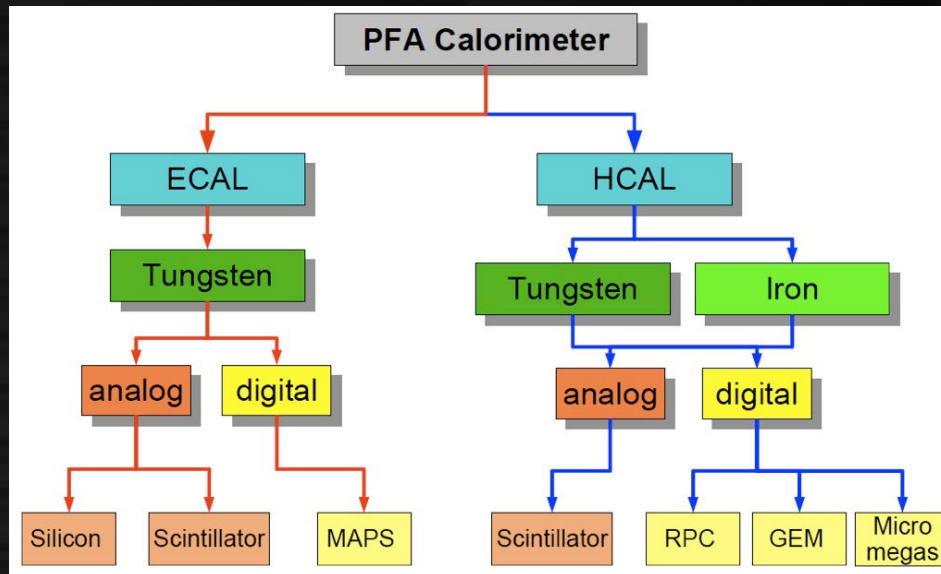
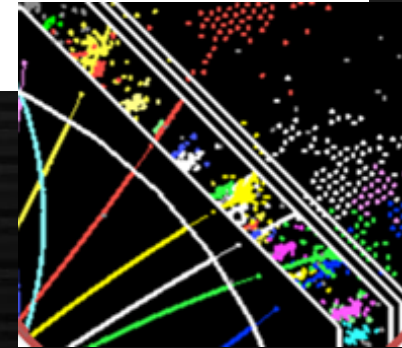
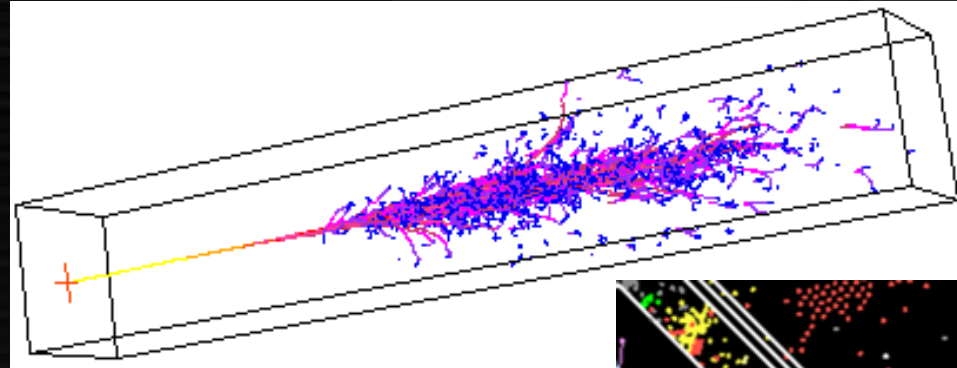
陽イオンがチェンバーに戻るのを防ぐ高開口部(>80%)のgating GEM



Schematics of TPC PID by  $dE/dx$  ( $dN/dx$ )

# カロリメータ

高エネルギー粒子が  
重い物質に入射すると、  
シャワー(電磁シャワー、  
ハドロンシャワー)を起こす  
→ シャワーの発展を  
4次元で測定 → imaging calorimeter



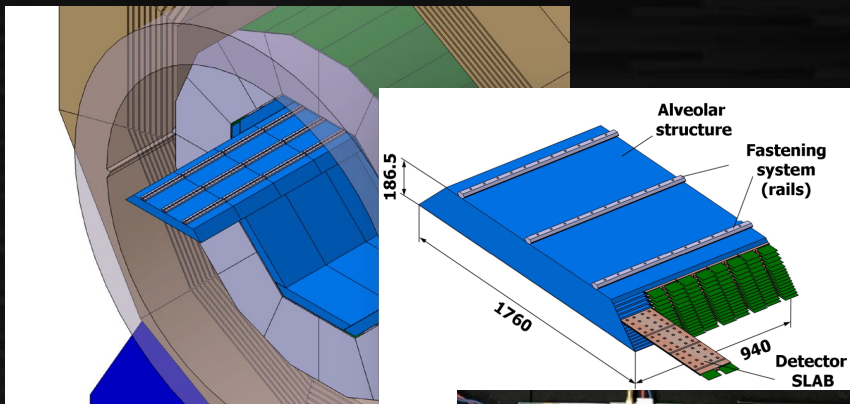
電磁カロリメータと  
ハドロンカロリメータに  
分かれている

様々なテクノロジーが提案  
されている

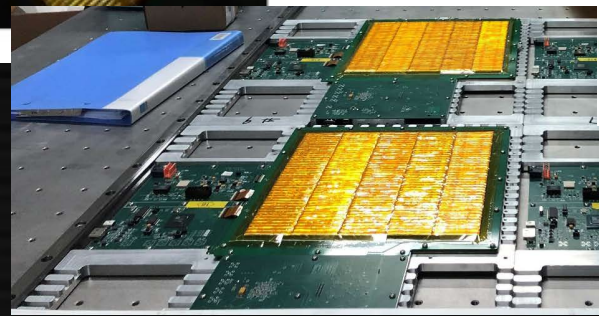
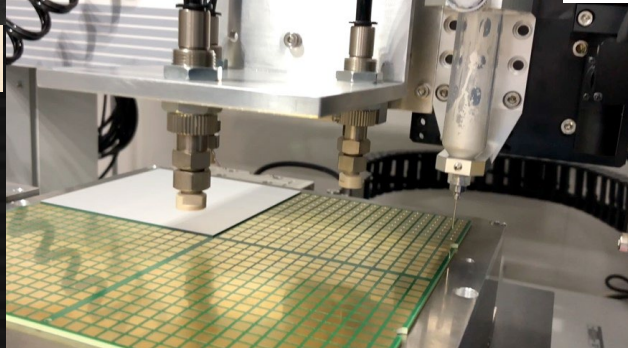
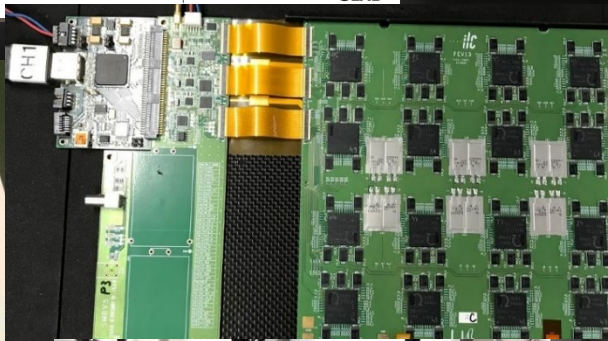
# 電磁カロリメータ

タングステンとセンサーの  
多層カロリメータ (20-30層)  
読み出し回路(ASIC, フロントエンド)  
をセンサーと吸収層の間に  
挟み込んでいる  
合計 $10^7 \sim 8$ チャンネル

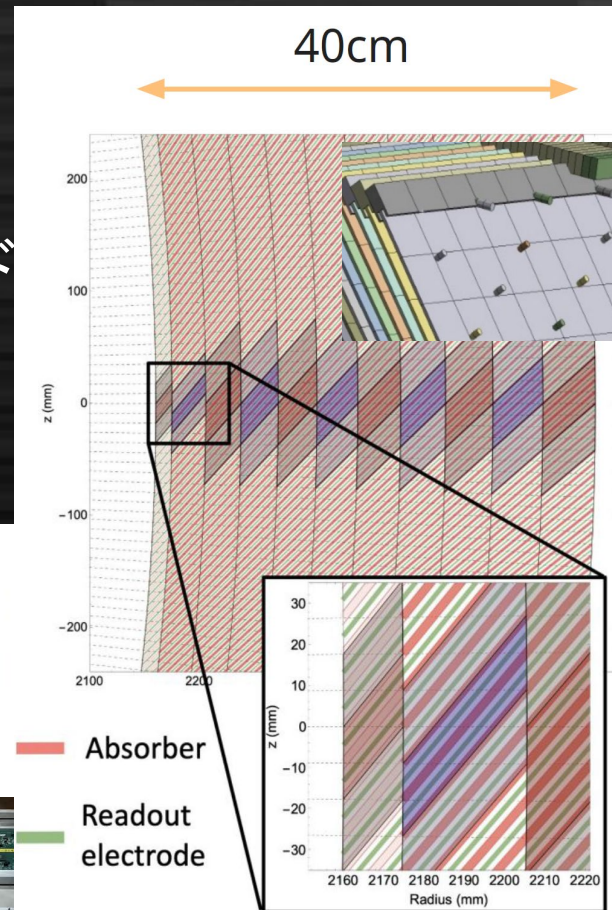
もっと細かい  
MAPS CAL  
の提案も



シリコンセンサー  
(浜松ホトニクス製)  
日仏共同開発



シンチレータ (日中独)

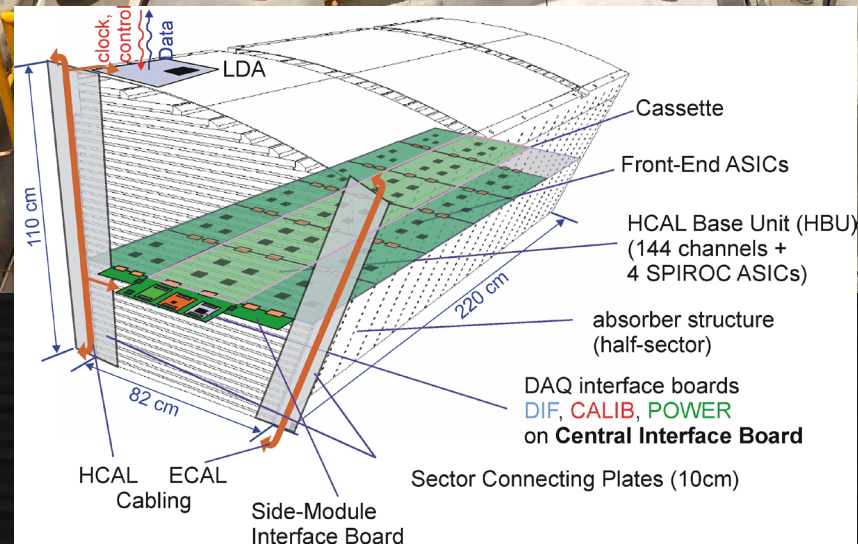
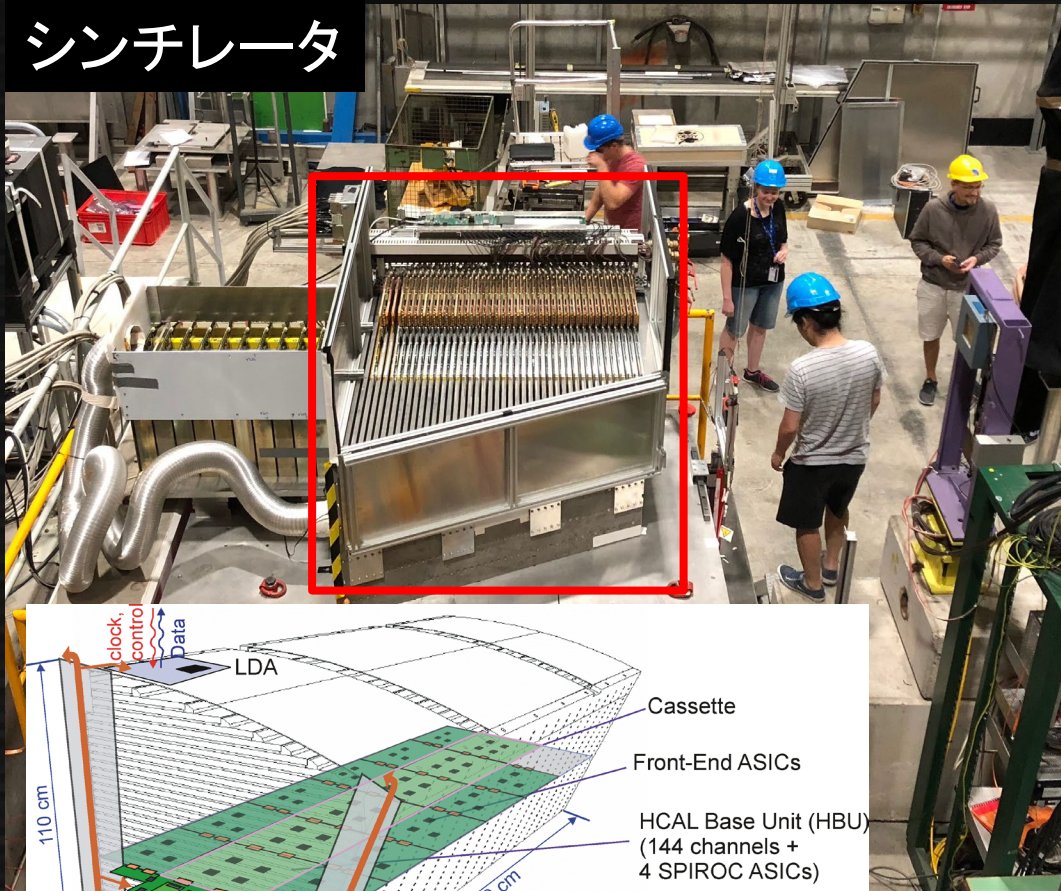


Noble liquid (LAr) calo  
reasonable granularity  
with better EM energy  
resolution

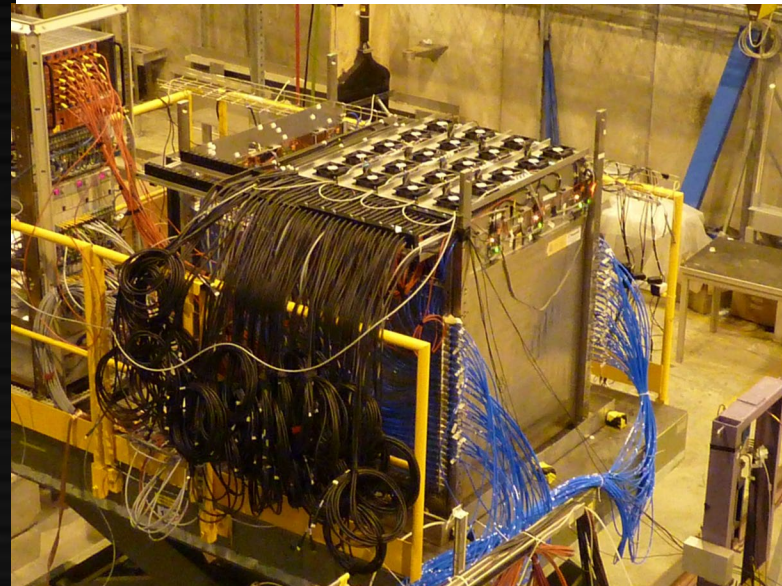
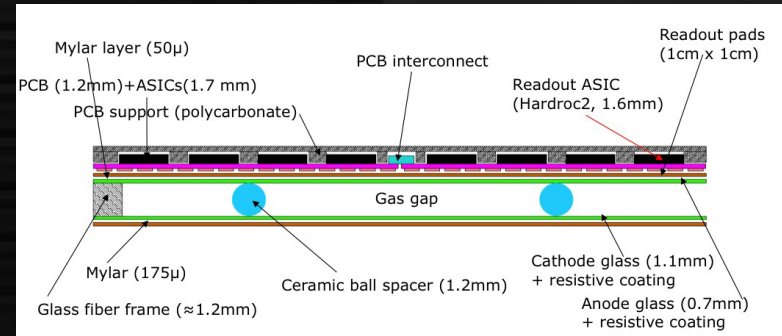


# ハドロンカロリメータ

## シンチレータ



## ガスRPC



# Recent focus: timing measurement

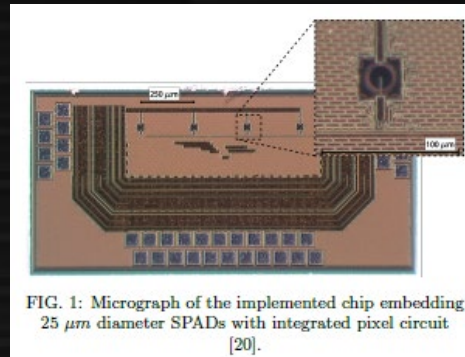
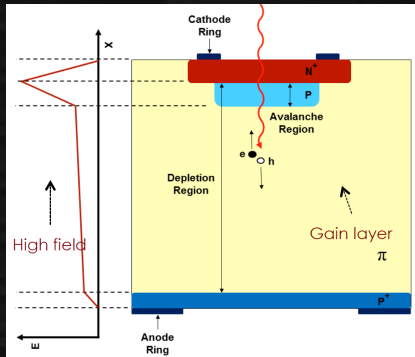
Several technologies recently targets  $< 30$  psec timing measurements

- LGAD (silicon) / SPAD
- Scintillator / Cherenkov based
- RPC / gas based

Possible application at HF detectors

- Pileup rejection? (for circular HF)
- Hadron PID with time-of-flight  $\sim 30$  ps
- Improving particle flow performance (5D imaging calorimeter)  $\sim 10$  ps
- Photons from b/c hadrons  $\sim 3$  ps

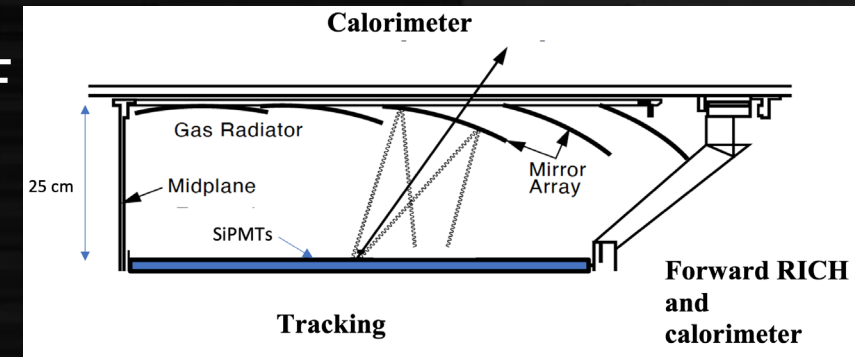
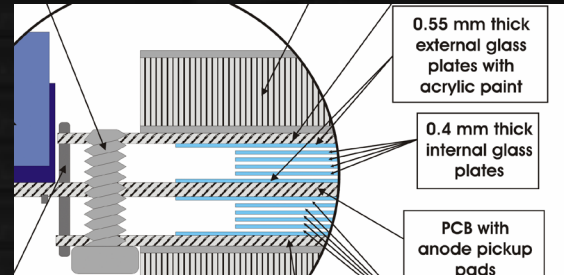
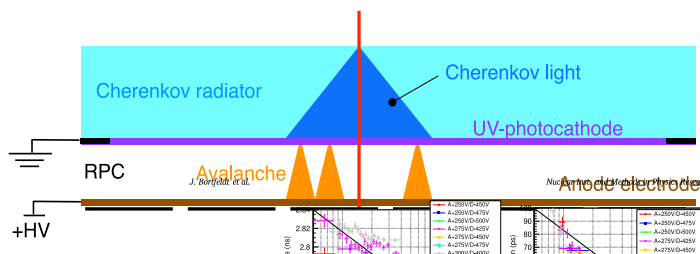
Needs innovative sensors & software



Still significant effort required towards realistic design at HF

## Cherenkov detector

Charged particle



Alternative idea to use RICH for PID

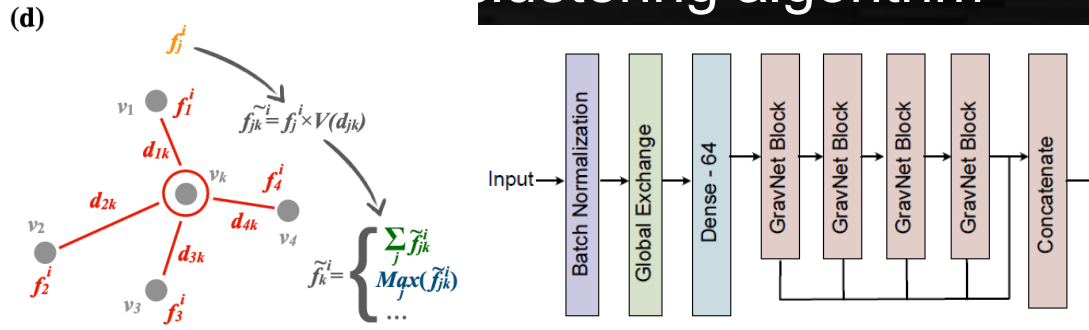
# Resent focus: applying deep learning

Particle flow with Graph Neural Network

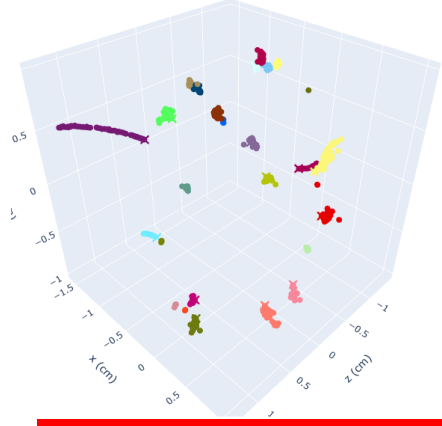
Flavor tagging with GNN/Transformer

Adding track-cluster matching to HGCAL clustering algorithm

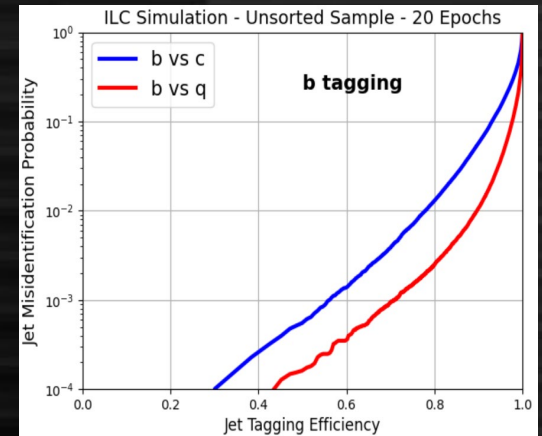
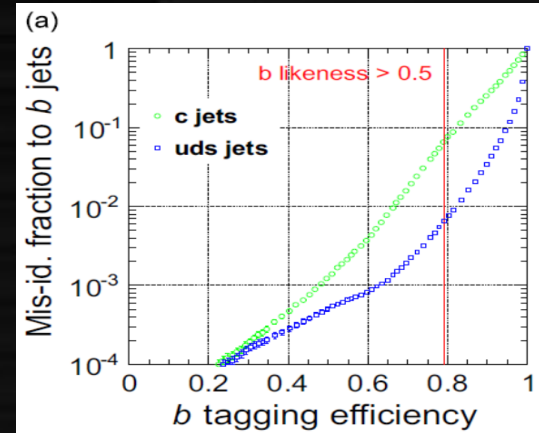
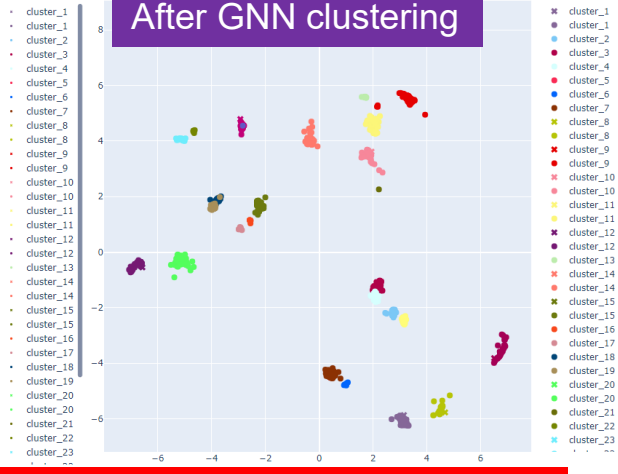
Applying algorithm developed at CMS flavor tagging: 5-10 better rejection than old (BDT) method



Real coordinate



After GNN clustering

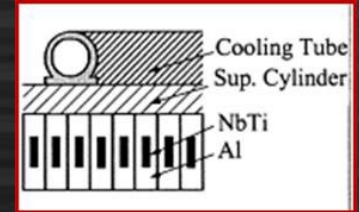


Method	b-tag 80% eff.		c-tag 50% eff.	
	c-bkg acceptance	uds-bkg acceptance	c-bkg acceptance	uds-bkg acceptance
LCFIPlus	10%	1%	10%	2%
ParT	1.29%	0.25%	1.02%	0.43%

Good synergy with hadron colliders

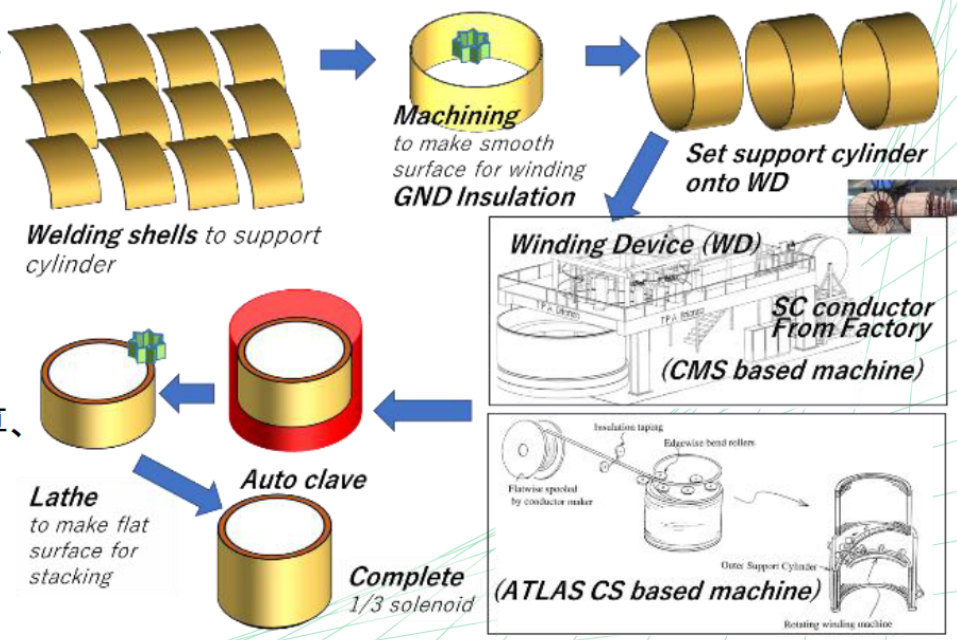
# 測定器ソレノイド用アルミ安定化超伝導線

低物質量ソレノイド製作のためアルミ被覆の超伝導線が使われてきたが製作技術が失われつつある。将来実験のための共同研究の提案がKEKから出されている。



## Development of large solenoids for future detectors

1. 将来の検出器用大型アルミ安定化線材の開発
  - CERNが中心にアルミ安定化線供給体制を再構築しようとしているが、それに協力していく。
    - 日本の製造経験者からの情報を提供。
    - 再構築にあたっての技術情報を得る。
    - 可能な要素試験や要素開発があれば協力する。
    - CERNへ派遣し、解析などのマンパワーとなる。
  - アルミ被覆法の代替案の検討。
2. ソレノイド製造方法の開発
  - ILDを一つの対象として詳細設計(磁場計算、応力計算、クエンチ計算、冷却計算等)を行う。
  - コイルの製造方法について調査、検討。
    - CMSの実績の調査(コイルモジュールのドッキング)
    - 巻線機(多層直接内巻き)の開発
    - 残線を使ってモデルコイルの作成し、製造にかかる技術要素の検証をする。

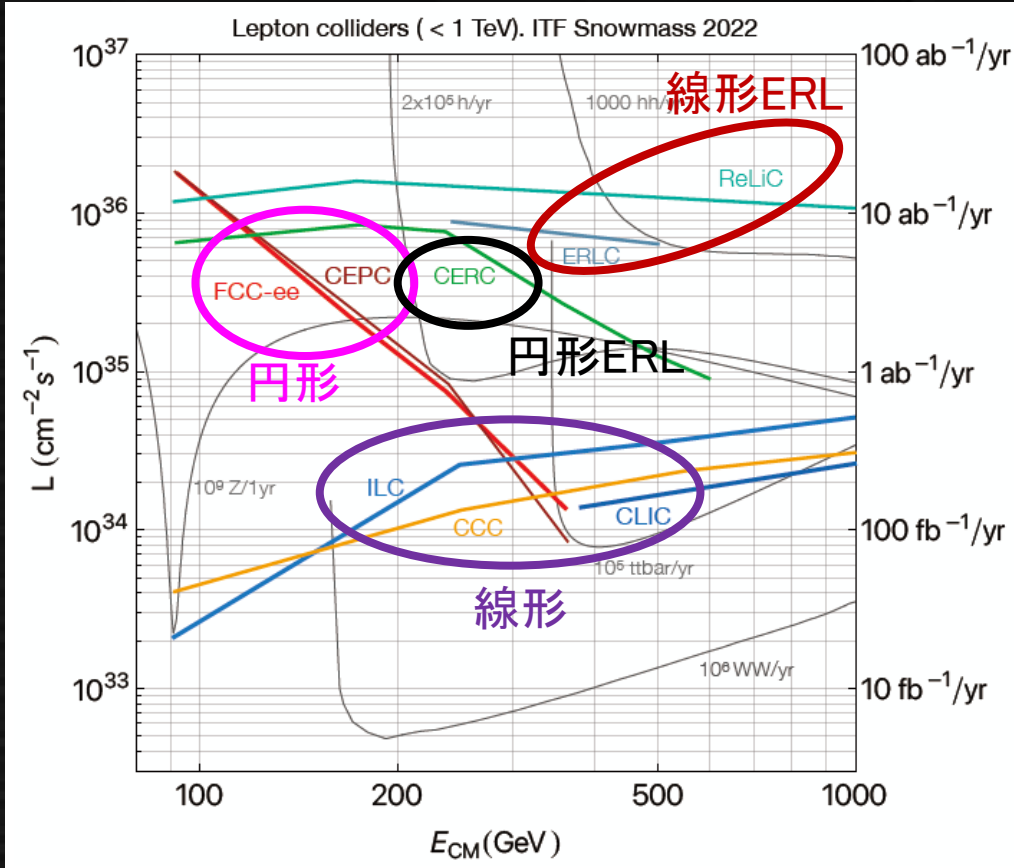


# Summary

- 世界には様々なHiggs factory計画がある
  - どれか一つ実現したい
  - 線形はエネルギー拡張性とコスト、円形はハドロンへの転換が売り
  - ILCは日本にとってよいオプション
- 各エネルギーで見たい物理のターゲットがある
  - Higgs/電弱精密測定による新物理探索
  - トップ精密測定、Higgs自己結合、Top Yukawa
  - 新物理直接探索 (1 TeV Higgsinoが最終ターゲット)
- 革新的な測定器開発へさまざまな努力が続く
  - 共同研究の種を探したい



# 線形コライダーと円形コライダー



- 91–160 GeV  
円形コライダーが有利  
(線形ERLでは円形に近いluminosityに到達可)
- 250 GeV  
円形コライダーがやや高いluminosity  
線形コライダーの偏極により物理reachは同等
- 350 GeV  
円形コライダーでも可能だが線形が有利
- > 500 GeV  
線形コライダーでのみ実現可能  
(円形ERLで550 GeVはぎりぎり到達可能)

Note: FCCeeの建設費はILC500と1000の間くらい **ppにしないとコスト的にunreasonable**  
 円形 > 250 GeVは電力消費が非常に大きい(現実的にはERLが必要か)  
 ERL技術は原理的実証はされているが実装には多くの課題がある

# 技術要素の絵

(barの色の濃いところはその時点で実験が可能と見込まれる時期)

FCC-hhもこの辺り?



Euro-XFEL (23.6MV/m)  
ILC250GeV向けの量産 (31.5MV/m)



Nb空洞50MV/m  
(multi-cavity実現から20-25年とすると、2040-45くらい?)

Nb空洞70MV/m w/ 進行波  
(multi-cavity R&Dにあと数年+量産にむけたR&Dで20-25年?)

Nb空洞多層薄膜100MV/m  
(2030-40年にはmulti-cavityで実現できる?)

KEK ATF/ATF2でビーム計測技術など必要な要素技術の開発。陽電子源などの開発も5-10年くらい?

SACLA@SPRing8, SwissFEL w/ ~35MV/m C-band)

C-band w/ cooling 70MV/m (from C3 paper)

C-band w/ cooling 120MV/m (70MV/mのlimitはRF power source.)

この勾配で550GeV upgradeを想定。3TeVにしようとするmain linac電力で650MWの見積もり

Beam monitor他のR&D要素を5-10年でR&D

X-band 80MV/m w/ beam drive (CLIC plan. for 380GeV)

X-band 72/100MV/m w/ beam drive (CLIC plan for 3TeV)

(72MV/m??? + 100MW x ???, 44km)

必要なalignment精度などの要素技術はCERN test facilityでdemo済み?

drive-beam 2本目、high-RF開発など

→ X-band 200MV/m? or G-band RF源が難しくなる。レーザー駆動? THz加速器へ

>10TeVへは新奇加速?

THz-誘電体加速 (DLW +レーザー/ビーム)

現在実証段階→実験への応用に5-10年?

Structure WFA, LWFA-LC 3TeV (snowmass AF-ITF reportによると実験まで>25yrs)

PWFA-LC 3TeV

加速部以外に必要な技術要素にどのくらいR&Dが必要? 例えば ナノビームのビームサイズの計測、制御。

LC技術ロードマップ by 坂下さん@湯河原合宿

## 超伝導LC

- システムとして完成度が最も高い。唯一2030年代に現実的に実現可能
- 現在の加速勾配は低め
- ~100 MV/m程度までのアップグレードパス (2-3 TeVがmax energy)

## 常伝導LC

- C-bandは建設費は少し安くなる可能性があるが全体設計は未熟
- ルミノシティに懸念あり
- 加速勾配は高い (特にX-band。ただし技術要求も高くなる)

## 新奇加速

- 上記のLCからの置き換えで > 10 TeVを目指す



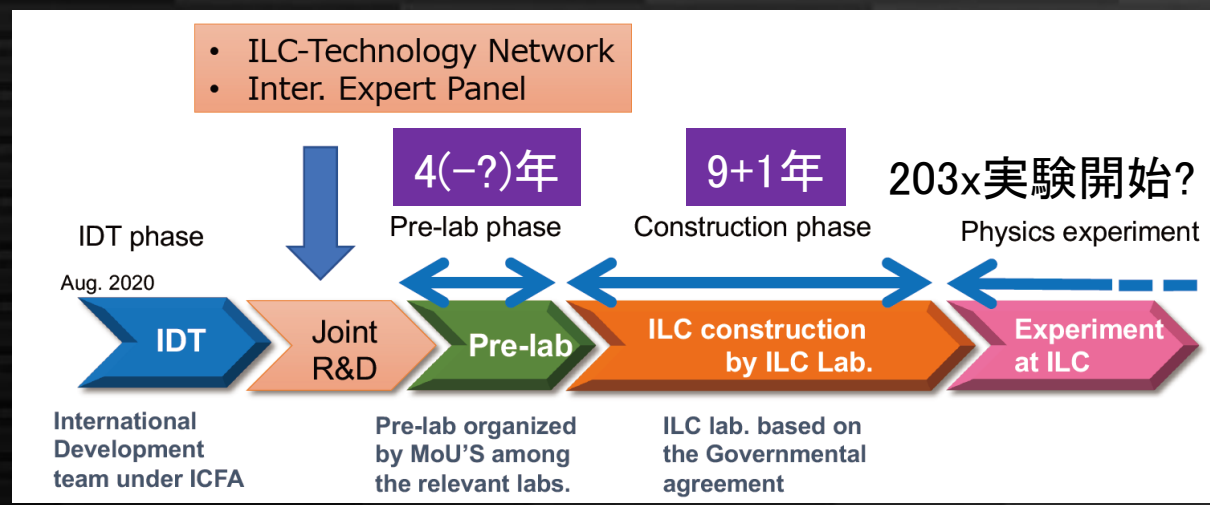
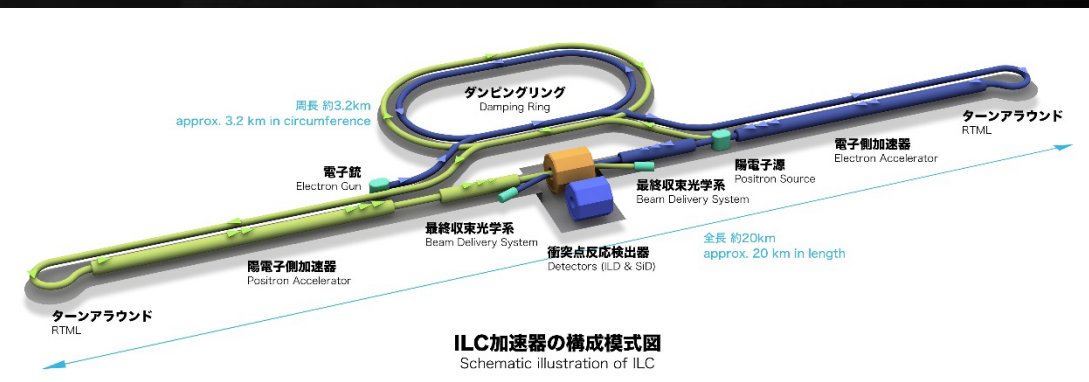
# $e^+e^-$ collider projects

## • 線形加速器

- ILC (日本) 250 GeV (初期) → multi-TeVへ  
超伝導LC。2030年代後半の実現を目指す。最もmatureなproject
- CLIC (CERN) 380 GeV → 3 TeVへ  
常伝導(X-band)LC。FCCのbackup optionとして生き残っている。CERN自力での建設が一応可能
- CCC (US) 250 GeV → multi-TeVへ  
冷却常伝導(C-band)LC。全体設計はPre-CDRレベル。最短で2040年代の実現
- HELEN (US)  
超伝導LC。travelling waveにより高い加速勾配を構想。Pre-CDRレベルで本格検討はこれから。

## • 円形加速器

- FCCee (CERN) 91 GeV → 250 GeV → 350 GeV  
FCChhとセットの計画。13 BCHF (ILCの2倍以上)。2048年開始を構想。250 GeV到達は更に10年後?
- CEPC (中国)  
FCCeeよりやや保守的なパラメータ。大きさは同程度。CDRレベル。ハドロンの計画(SppC)もある



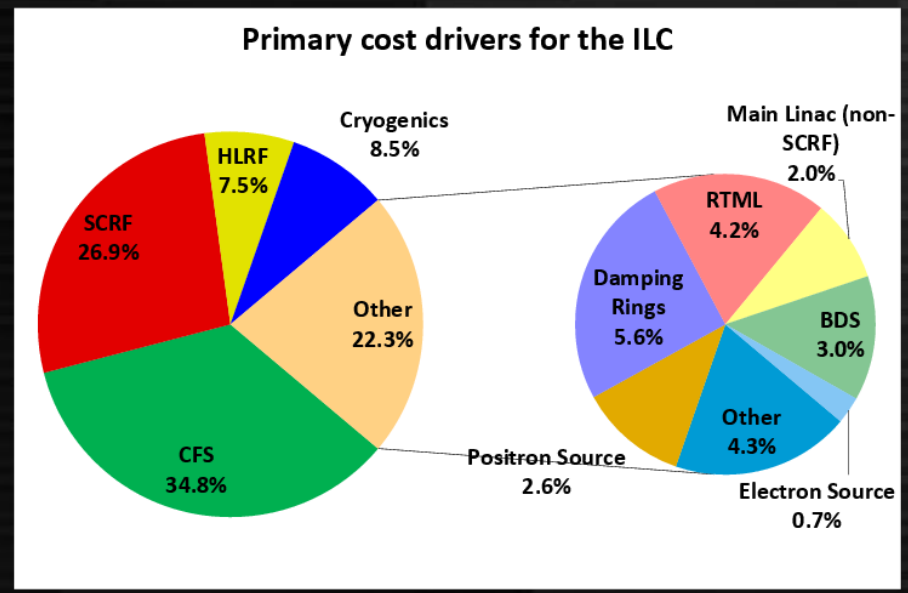
「pre-labはILC建設を前提としない」ことが必要

「国際協力で日本に建設する国際プロジェクト」  
超伝導加速空洞、加速部12 km, 全長20 km  
加速勾配平均32 MV/m

残された技術課題

+海外のサポート  
国内コミュニティの覚悟

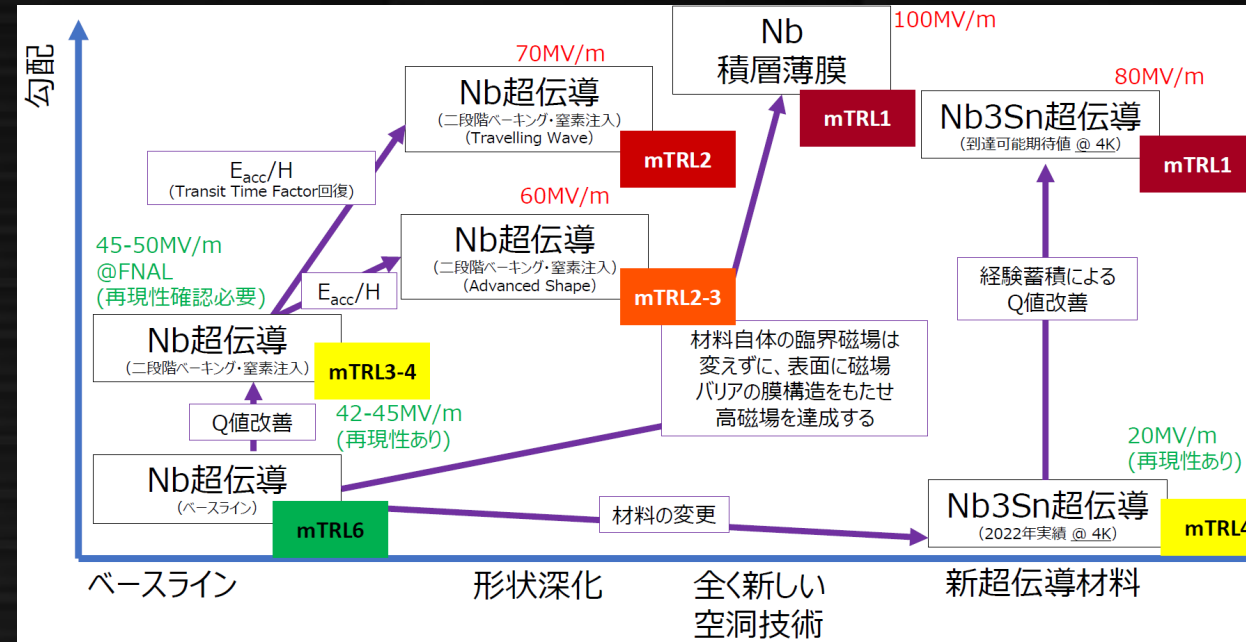
- 空洞量産体制の確立、表面処理の改善による勾配向上
- 陽電子源、ダンピングリング、最終収束、ビームダンプ
- 測定器の最終設計・量産技術の確立
- 土木・施設の詳細設計・環境アセスメントなど



ILC加速器のコスト見積もり: 5152-5830億円 (±25%)

# ILC (upgrade path)

将来計画委員会 加速班のまとめ



- 45–50 MV/m  
空洞表面処理の改善  
(うまくいけばILCにそのまま使える)
- 60–70 MV/m  
空洞形状の改善・進行波加速管  
(抜本的なデザイン変更, upgrade用)
- 100 MV/m  
積層薄膜 (原理実証の段階)
- それ以上  
新奇加速に置き換え or afterburner

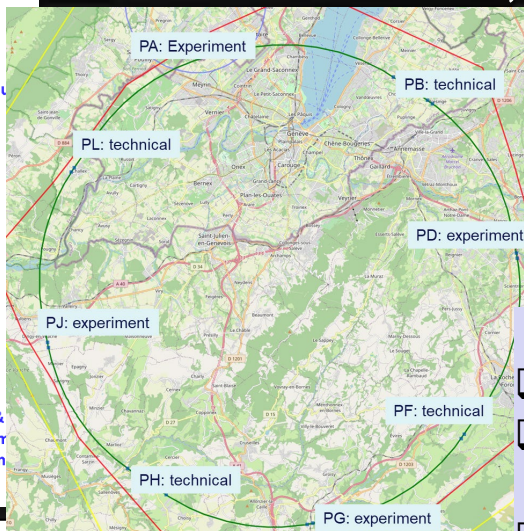
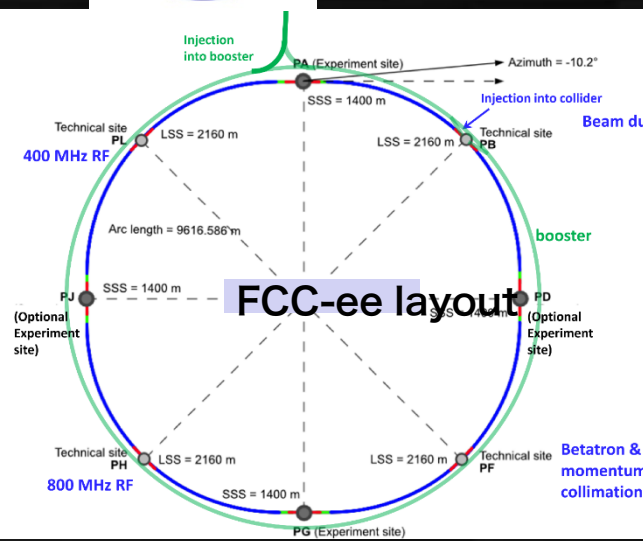
## Possible upgrade シナリオ

- –2050年: 250 GeV Higgs factory (表面処理の改善がよければ350 GeVも?)
- 2050年–: 550 GeV – 1 TeV with 60–70 MV/m (追加部分)
- 2070年–: 2–3 TeV with 100+ MV/m (薄膜) 既存空洞の置き換えが必要  
(電力に対して抜本的な何かが必要?)



# FCCee

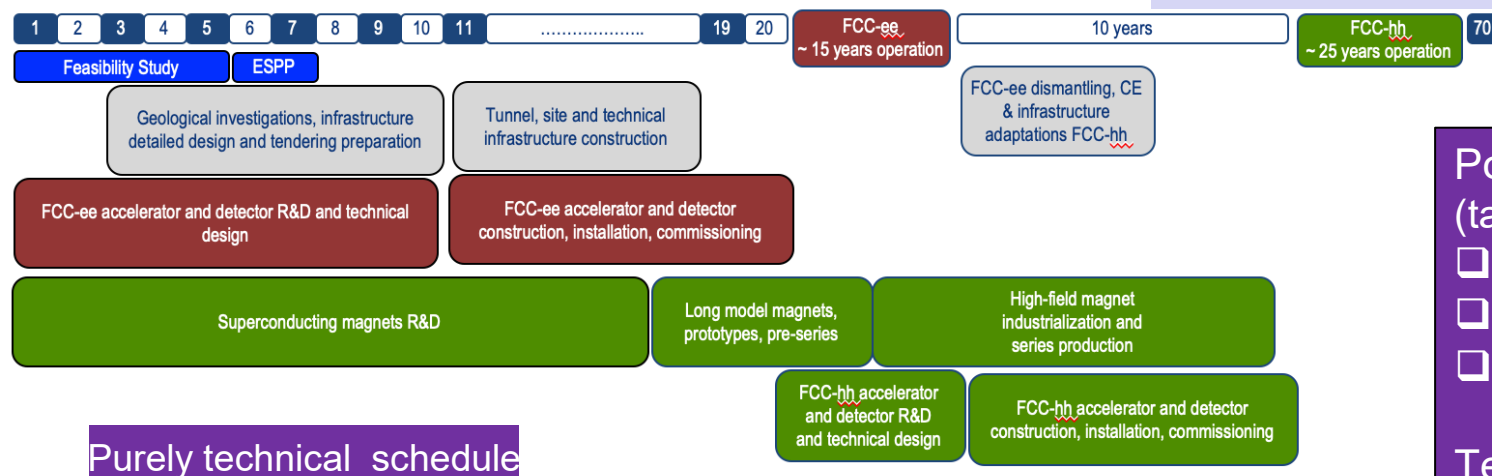
周長 91.1 km, 2 IP, エネルギー 91-350 GeV



	$\sqrt{s}$	L/IP (cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> )	Int. L/IP(ab <sup>-1</sup> )	Comments
e <sup>+</sup> e <sup>-</sup> FCC-ee	~90 GeV Z	230 x 10 <sup>34</sup>	75	2-4 experiments Total ~ 15 years of operation
	160 WW	28	5	
	240 H	8.5	2.5	
	~365 top	1.5	0.8	
pp FCC-hh	100 TeV	5 x 10 <sup>34</sup> 30	20-30	2+2 experiments Total ~ 25 years of operation
PbPb FCC-hh	$\sqrt{s_{NN}} = 39\text{TeV}$	3 x 10 <sup>29</sup>	100 nb <sup>-1</sup> /run	1 run = 1 month operation
ep Fcc-eh	3.5 TeV	1.5 10 <sup>34</sup>	2 ab <sup>-1</sup>	60 GeV e- from ERL Concurrent operation with pp for ~ 20 years
e-Pb Fcc-eh	$\sqrt{s_{eN}} = 2.2\text{ TeV}$	0.5 10 <sup>34</sup>	1 fb <sup>-1</sup>	60 GeV e- from ERL Concurrent operation with PbPb

## Feasibility Study:

- Focus is on FCC-ee and magnet R&D
- ~ 40 MCHF/year from CERN budget (half for magnet)
- Additional funding from EU and collaborating institutions
- Results will be summarised in Feasibility Study Report



コスト見積もりと財源の調査もFSに含む

## Possible schedule

(taking into account resources constraints):

- project's approval by end of decade
- construction's start early 2030s
- FCC-ee operation: 2048-2063 (10 years Z, W, H and 5 years tt)

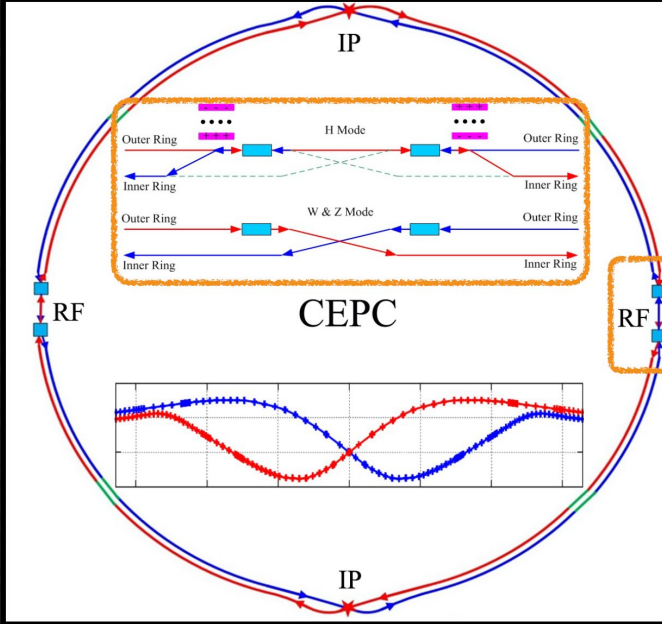
Technical schedule: operation starts early 2040s

Purely technical schedule



# CEPC

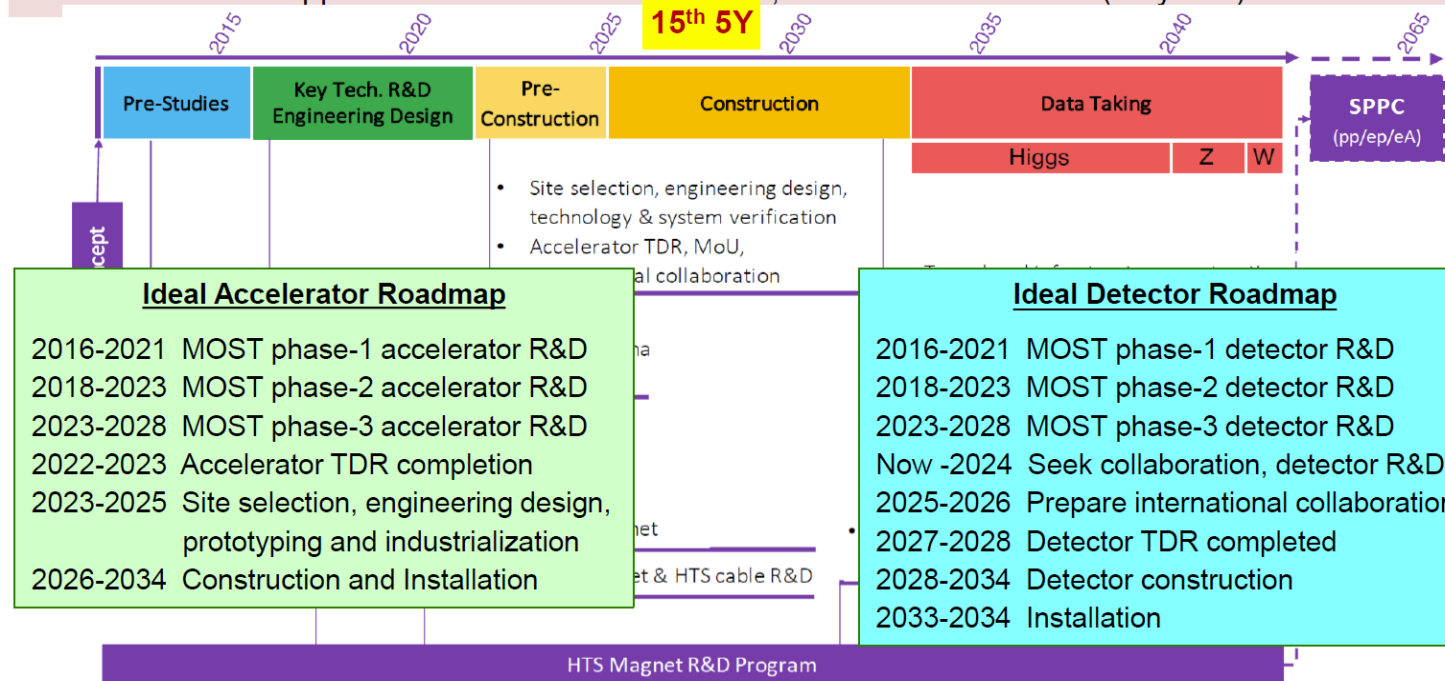
周長 100 km, 2 IP, エネルギー 91-240 GeV (+ 360 GeV)



- Strong support from MoST, CAS and NSFC, at a total funding level of > 40 M \$
- CDR completed, TDR to be completed soon

「Ideal schedule」

- ❑ 2013-2025: Key technology R&D, from CDR to TDR, site selection, international collaboration etc.
- ❑ Ideal case: Approval in the 15<sup>th</sup> Five-Year Plan, and start construction (~8 years)



Operation mode	ZH	Z	W*W'	tt
$\sqrt{s}$ [GeV]	~240	~91.2	158-172	~360
L / IP [ $\times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ]	CDR (2018)	3	32	10
	Latest	5.0	115	16
			16	0.5

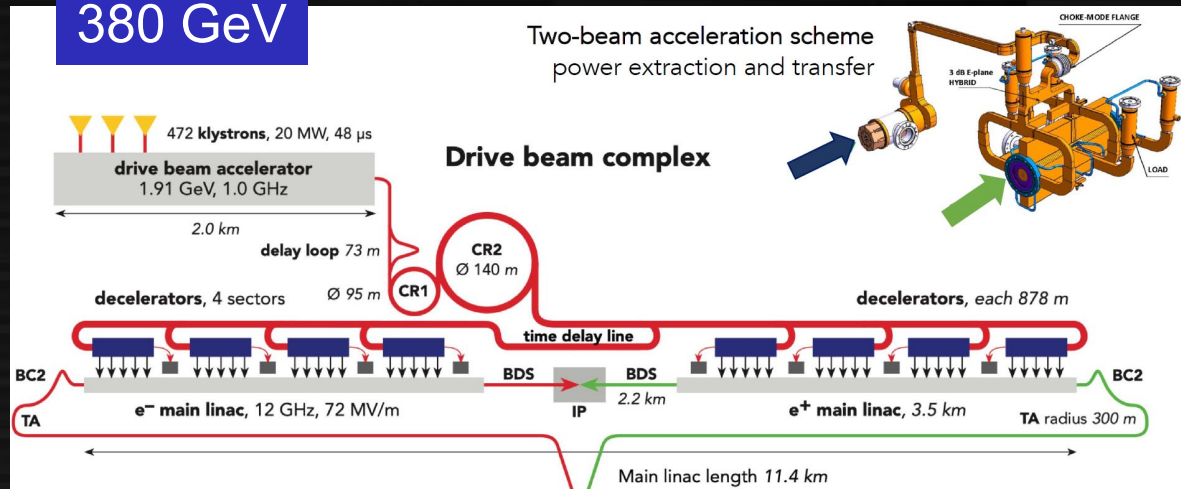


# CLIC

X-band 常伝導LC, 2ビーム方式 or 従来(クライストロン)方式

380 GeV

Two-beam acceleration scheme  
power extraction and transfer



ビーム加速は実証済み

- 大量生産の経験 (cf. XFEL for ILC)
- 電力消費の問題

## CLIC goals:

- finalise X-band technology towards construction readiness (accelerating structure's conditioning and manufacturing)
  - improve power efficiency (e.g. klystrons)
  - optimise luminosity for first-stage machine (beam dynamic studies, machine alignment and stability, etc.)
- "Project Readiness Report" by end 2025 (as input to next ESPP)

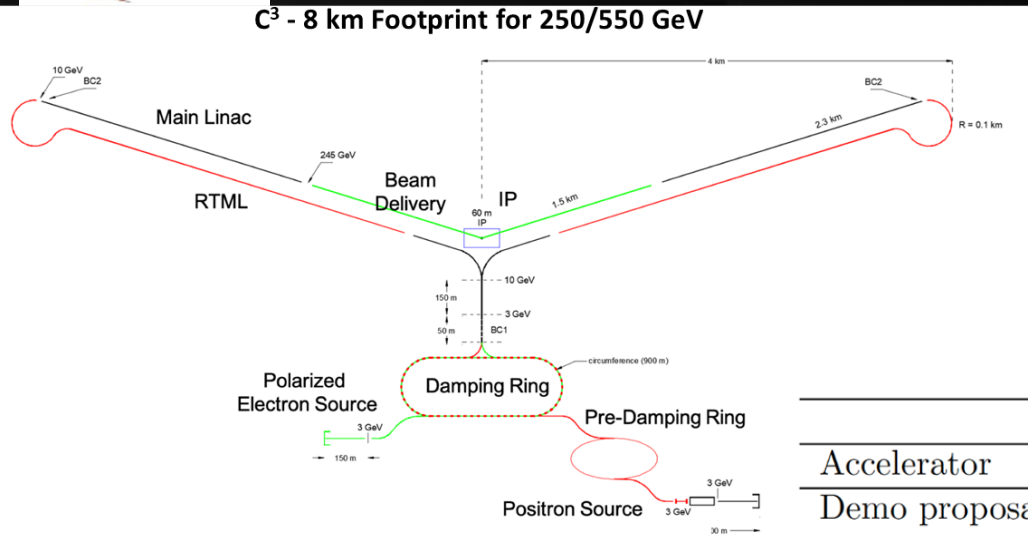
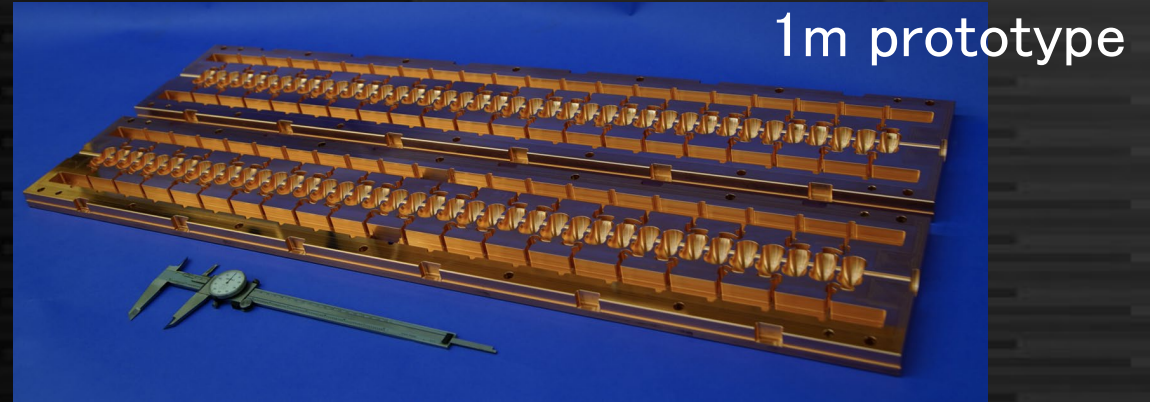
Parameter	Unit	Stage 1	Stage 2	Stage 3
$\sqrt{s}$	GeV	380	1500	3000
Tunnel length	km	11	29	50
Gradient	MV/m	72	72/100	72/100
Pulse length	ns	244	244	244
Luminosity (above 99% of $\sqrt{s}$ )	$10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$	1.5 0.9	3.7 1.4	5.9 2
Repetition frequency	Hz	50	50	50
Bunches per train		352	312	312
Bunch spacing	ns	0.5	0.5	0.5
Particles/bunch	$10^9$	5.2	3.7	3.7
Beam size at IP ( $\sigma_y/\sigma_x$ )	nm	2.9/149	1.5/60	1/40
Annual energy consumption	TWh	0.8	1.7	2.8
Power consumption	MW	170	370	590
Construction cost	BCH	5.9	+5.1	+7.3

終わったわけではなかった (FCC次第では復活?)

ただしFCC FSのように多額の予算がついているわけではない



# C<sup>3</sup> (Cool Copper Collider)

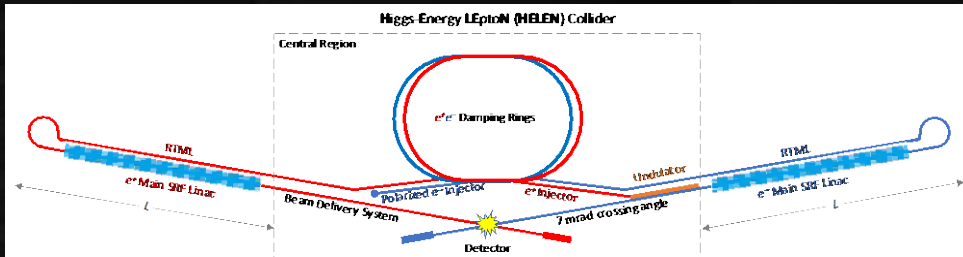


Technically limited timeline

Collider	C <sup>3</sup>	C <sup>3</sup>
CM Energy [GeV]	250	550
Luminosity [ $\times 10^{34}$ ]	1.3	2.4
Gradient [MeV/m]	70	120
Effective Gradient [MeV/m]	63	108
Length [km]	8	8
Num. Bunches per Train	133	75
Train Rep. Rate [Hz]	120	120
Bunch Spacing [ns]	5.26	3.5
Bunch Charge [nC]	1	1
Crossing Angle [rad]	0.014	0.014
Site Power [MW]	~150	~175
Design Maturity	pre-CDR	pre-CDR

	2019-2024	2025-2034	2035-2044	2045-2054	2055-2064
Accelerator					
Demo proposal					
Demo test					
CDR preparation					
TDR preparation					
Industrialization					
TDR review					
Construction					
Commissioning					
2 $ab^{-1}$ @ 250 GeV					
RF Upgrade					
4 $ab^{-1}$ @ 550 GeV					
Multi-TeV Upg.					

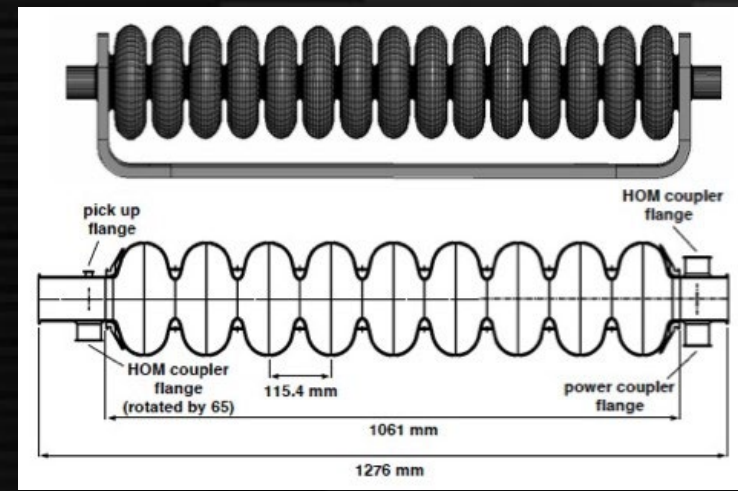
# HELEN (Higgs-Energy LEptoN collider)



Parameter	Advanced SW	Traveling wave	Nb <sub>3</sub> Sn
Accelerating gradient (MV/m)	55	70	90
Fill factor	0.711	0.804	0.711
Real estate (effective) gradient (MV/m)	39.1	55.6	64.0
Cavity Q (10 <sup>10</sup> )	1.0 (2 K)	0.69 (2 K)	1.0 (4.5 K)
Active cavity length (m)	1.038	2.37	1.038
Cavity R/Q (Ohm)	1158	4890	1158
Geometry factor G (Ohm)	279	186	279
B <sub>pk</sub> /E <sub>acc</sub> mT/(MV/m)	3.71	2.89	3.71
E <sub>pk</sub> /E <sub>acc</sub>	1.98	1.73	1.98
Number of cavities	4380	1527	2677
Number of cryomodules	505	382	309
Collider length (km)	9.4	7.5	6.9
AC power for main linacs (MW)	49	39	58
Total collider AC power (MW)	121	110	129

- Option 1:** Advanced geometry standing wave (SW) structure operating at 55 MV/m. Combining and advanced cavity shape and new treatment recipes should allow reaching accelerating gradients of ~60 MV/m. This version is essentially the ILC with different SRF cavities operating at higher gradient. Assuming the LSF accelerating structure operating at 55 MV/m, the HELEN collider would be 9.4 km long.
- Option 2 (baseline):** TW structure operating at 70 MV/m. The traveling wave option assumes an accelerating gradient of 70 MV/m. With accelerating structures about 2 times longer than the ILC (TESLA) cavities, the fill factor increases to 80.4% and the collider will be 7.5 km long.
- Option 3:** Nb<sub>3</sub>Sn structure operating at 90 MV/m. For this option, we assume the LSF-shape cavities

ほとんど  
ILC in US.  
ただしTW  
structureに  
重点がある

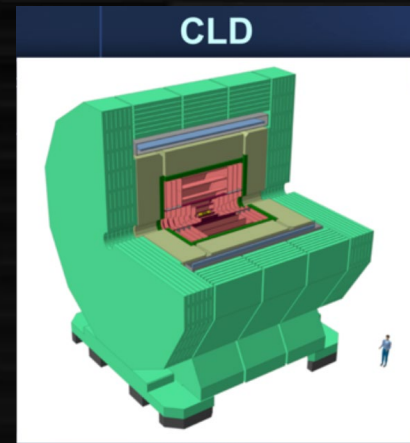


Travelling-wave structure



# Higgs factoryの物理/測定器開発戦略

- 欧州の動き
  - EPPSU後、将来コライダー特にHiggs factoryの測定器開発を推進 (ECFA detector R&D roadmap)
  - FCCeeの測定器はILDやCLICを参照してデザインされている  
連続読み出しのためにupdateが必要 + 新規技術(pixel, timing等)も
- 米国の動き
  - Snowmassでは将来コライダーの測定器開発をendorse → P5へ
- ILCはFCC(ECFA)の物理/測定器のmomentumを活用したい
  - ILDはFCCeeと協力してやっていく方向



Full silicon tracker  
3D High granularity calorimeter  
Solenoid outside calorimeter

derived from the CLIC detector



Ultra-light drift chamber  
Dual-readout calorimeter  
Solenoid inside calorimeter

new, possibly more cost effective design